PALÉOANTHROPOLOGIE
Homo naledi, le fossile qui dérange

ASTRONOMIE
Une exoplanète aux anneaux géants

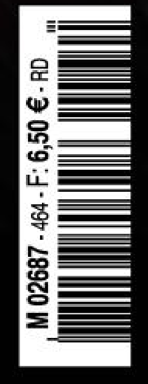
BIOTECHNOLOGIES
« Nouveaux OGM » : un débat manipulé ?

POUR LA SCIENCE

Juin 2016 - n° 464 · www.pourlascience.fr

Édition française de Scientific American

La cryptographie quantique
un système garanti sans failles ?



BEL : 7,2 € - CAN : 10,95 $ CAD - DOM/S : 7,3 € - Réunion/A : 9,3 € - ITA : 7,2 € - LUX : 7,2 € - MAR : 60 MAD - TOM : 980 XPF - PORT.CONT. : 7,2 € - CH : 12 CHF - TUN/S : 8,4 TND



8 rue Férou - 75278 Paris Cedex 06

Groupe POUR LA SCIENCE
Directrice des rédactions : Cécile Lestienne

Pour la Science
Rédacteur en chef : Maurice Mashaal
Rédactrice en chef adjointe : Marie-Neige Cordonnier
Rédacteurs : François Savatier, Philippe Ribeau-Gésippe, Guillaume Jacquemont, Sean Bailly
Dossier Pour la Science
Rédacteur en chef adjoint : Loïc Mangin
Développement numérique : Philippe Ribeau-Gésippe, assisté de Alice Maestracci
Directrice artistique : Céline Lapert
Maquette : Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy
Correction et assistance administrative : Anne-Rozenn Jouble
Marketing & diffusion : Laurence Hay et Ophélie Maillet, assistées de Marie Chaudy
Direction financière et direction du personnel : Marc Laumet
Fabrication : Marianne Sigogne et Olivier Lacam
Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé
Anciens directeurs de la rédaction : Françoise Pétry et Philippe Boulanger
Conseiller scientifique : Hervé This
Ont également participé à ce numéro :
Denis Auroux, Razvan Caracas, Renaud Coulangeon, Catherine Hordelalay, Anne Dambricourt-Malassé, Uwe Meierhenrich, Jean-Jacques Perrier, Christophe Pichon, Daniel da Rocha, Françoise Roques, Daniel Tacquenet

PRESSE ET COMMUNICATION
Susan Mackie
susan.mackie@pourlascience.fr - Tel. : 01 55 42 85 05
PUBLICITÉ France
Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin
jf.guillotin@pourlascience.fr
Tél. : 01 55 42 84 28 • Fax : 01 43 25 18 29
ABONNEMENTS
Abonnement en ligne : http://boutique.pourlascience.fr
Courriel : pourlascience@abopress.fr
Téléphone : 03 67 07 98 17
Adresse postale : Service des abonnements - Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053, 67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an - 12 numéros
France métropolitaine : 59 euros - Europe : 71 euros
Reste du monde : 85,25 euros

COMMANDES DE LIVRES OU DE MAGAZINES
Pour la Science
628 avenue du Grain d'Or, 41350 Vineuil
pourlasciencevpc@daudin.fr • Tél. : 02 18 54 12 64
DIFFUSION
Contact kiosques : À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet
Tel : 04 88 15 12 41
Information/modification de service/réassort :
www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN Editor in chief : Mariette DiChristina. Executive editor : Fred Guterl. Design director : Michael Mrak. Editors : Ricky Rusting, Philip Yam, Robin Lloyd, Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong. President : Keith McAllister. Executive Vice President : Michael Florek.







Maurice Mashaal
rédacteur en chef

Protection quantique

Après avoir marqué la science du XXe siècle, la physique quantique est bien partie pour marquer aussi le XXIe. C'est notamment le cas dans le domaine de la protection des données, grâce à l'avènement ces deux dernières décennies d'une « ingénierie quantique », où l'on manipule finement les états quantiques d'atomes ou de photons.

Les méthodes actuelles utilisées pour chiffrer et ainsi protéger des données ou un message doivent leur sécurité au principe suivant : une personne indiscrète ne disposant pas de la clé de décryptage aurait à effectuer des calculs trop volumineux pour qu'elle puisse déchiffrer en temps utile l'information interceptée.

Or ce principe de protection, qui sécurise notamment nos transactions bancaires, est menacé par l'ordinateur quantique, une machine encore hypothétique dont les capacités de calcul dépasseraient de beaucoup celles des ordinateurs classiques.

La cryptographie quantique, un antidote à l'éventuel ordinateur quantique

L'antidote existe cependant : la cryptographie quantique, qui utilise des états d'atomes ou de photons pour communiquer une clé secrète – l'avantage étant que, en vertu des lois quantiques, toute interception serait détectable. Les théoriciens ont même récemment montré que de telles procédures peuvent garantir une sécurité parfaite, que l'adversaire ait ou non un ordinateur quantique *(voir pages 26 à 35)*. Ces techniques restent toutefois difficiles à mettre en pratique. C'est pourquoi les chercheurs explorent aussi des procédés de chiffrement novateurs, mais non quantiques *(voir pages 36-37)*.

Il en va de la protection de la vie privée et des communications de tous les individus – qu'ils soient honnêtes ou, hélas, malfaisants. Les écoutes illégales, le bras de fer entre Apple et le FBI à propos de l'accès aux données des téléphones et bien d'autres affaires ont montré combien l'enjeu est grand et d'actualité. ■

Ce numéro comporte deux encarts d'abonnement *Pour la Science* brochés sur la totalité du tirage.
En couverture : ©Alex Mit/Shutterstock.com

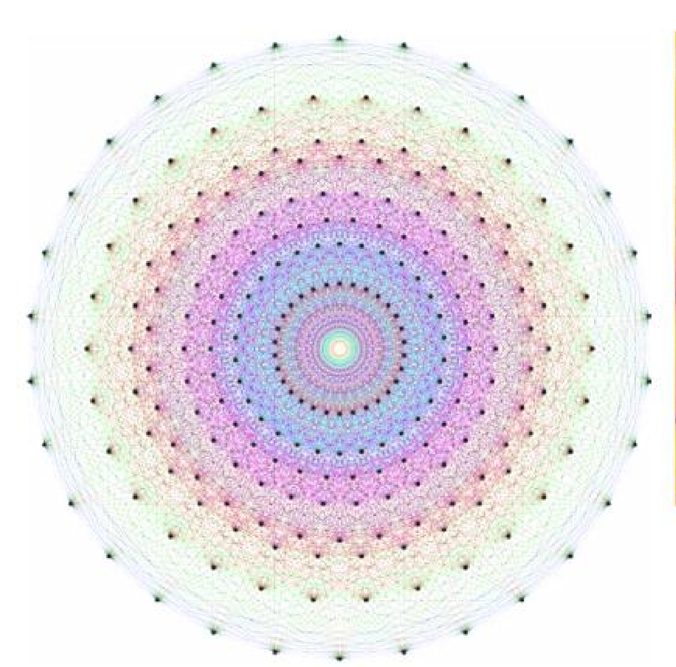


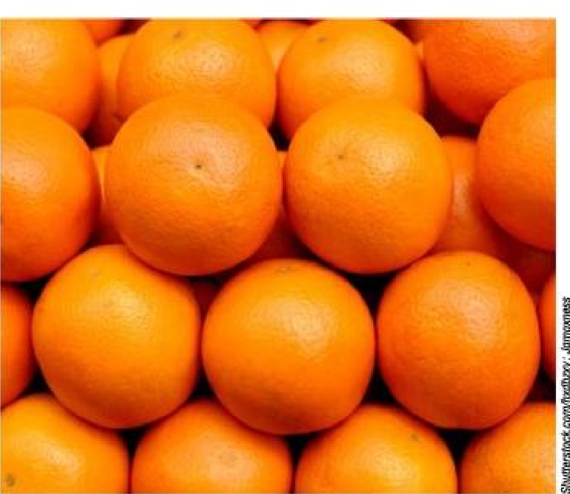
Rendez-vous

Mathématiques

Savez-vous empiler des oranges en dimension 8 ?

Le problème de l'empilement optimal des sphères dans l'espace ordinaire, à 3 dimensions, a été résolu en 1998. Il vient de trouver une solution en dimensions 8 et 24 !





Shutterstock.com/foodfoxy ; Jgmoxness

L'empilement d'oranges le plus dense est celui que l'on trouve sur les étalages de marchés. Mais qu'en est-il à 8 et 24 dimensions ? À 8 dimensions, la structure optimale est décrite par le groupe de symétrie E_8, dont une représentation projetée en deux dimensions est donnée à gauche.

Quelle est la meilleure façon d'empiler des sphères identiques, en laissant le moins possible de vides ? Ce problème a été rendu célèbre par Johannes Kepler, qui a conjecturé en 1611 que la configuration la plus dense est la structure pyramidale adoptée sur les étals des marchands de fruits et légumes. La conjecture de Kepler n'a été démontrée qu'en 1998 par Thomas Hales, alors à l'université de Pittsburgh.

S'il est simple de visualiser des tas d'oranges, il en va tout autrement quand on essaye d'imaginer le même problème dans un monde à 4 dimensions ou plus. Or la question de l'empilement des sphères dans un espace multidimensionnel est d'importance, car elle est reliée aux codes correcteurs d'erreurs, utilisés dans les télécommunications pour reconstituer le signal inévitablement altéré lors de sa transmission.

Un résultat intéressant vient d'être obtenu dans ce domaine : Maryna Viazovska, de l'université Humboldt à Berlin, aidée de plusieurs collègues, a résolu les cas à 8 et 24 dimensions.

Pour les mathématiciens, manipuler des oranges à quatre dimensions ou plus n'est pas un obstacle. Il se ramène à la définition formelle d'une sphère : c'est l'ensemble des points de l'espace – avec autant de dimensions que l'on veut – situés à une distance donnée d'un point particulier, le centre de la sphère. En revanche, l'ajout de dimensions rend le problème de Kepler plus difficile à résoudre, car il augmente le nombre d'arrangements possibles de sphères à examiner.

Une façon de construire les empilements est de partir de l'arrangement hexagonal à deux dimensions. En entassant des couches planes de telle façon que les sphères se posent dans les trous de la couche de dessous, on obtient l'arrangement « naturel » des étalages de fruits, qui est optimal en dimension 3.

Pour construire un empilement en dimension 4, on procède de la même façon, en entassant des arrangements tridimensionnels. Et ainsi de suite. En dimension 8, on obtient un réseau qui présente un grand nombre de symétries, ce qui en facilite l'étude. Ces symétries forment un « groupe » noté E_8, bien connu des mathématiciens (c'est le plus grand « groupe de Lie complexe de type exceptionnel »), mais aussi des physiciens qui l'étudient parfois dans le cadre des théories de grande unification en physique des particules.

Si l'on poursuit la procédure jusqu'à 24 dimensions, on obtient un réseau de Leech. Cette structure, découverte en 1965 par John Leech, présente également de nombreuses symétries. Le réseau de Leech est associé au code correcteur de Golay qui a été utilisé pour traiter les images des sondes *Voyager* prises lors de leur survol de Jupiter et Saturne, entre 1979 et 1981.

Mais E_8 et le réseau de Leech sont-ils les empilements les plus denses dans les espaces à 8 et 24 dimensions ? En 2003, Henry Cohn et Noam Elkies, mathématiciens à Cambridge, aux États-Unis, ont montré qu'il est possible de définir des fonctions, dites auxiliaires, qui donnent une estimation de la densité maximale d'empilement pour un espace de dimension

quelconque. Dans la plupart des cas, les meilleurs empilements connus étaient loin des valeurs limites calculées par les fonctions auxiliaires. Mais en dimensions 8 et 24, les empilements définis par E_8 et le réseau de Leech touchaient de près l'estimation la plus basse connue de la densité maximale, à moins de 10^{-30} près.

Pour s'assurer que ces empilements étaient les meilleurs, il fallait trouver la bonne fonction auxiliaire qui donnerait une borne supérieure correspondant exactement aux densités de E_8 et du réseau de Leech.

Le 14 mars 2016, Maryna Viazovska annonçait avoir trouvé cette fonction auxiliaire grâce aux formes modulaires, des objets mathématiques abstraits qui présentent des symétries particulières. Elle confirmait ainsi que E_8 correspond à la meilleure façon d'empiler des sphères en 8 dimensions. Le soir même, elle recevait un courriel de Henry Cohn qui suggérait d'appliquer sa méthode au réseau de Leech, pour le cas à 24 dimensions. Une semaine plus tard, avec trois autres chercheurs, Maryna Viazovska et Henry Cohn ont obtenu la confirmation que le réseau de Leech est la meilleure façon d'empiler des sphères à 24 dimensions.

Ce résultat ne change rien pour les codes correcteurs : E_8 et le réseau de Leech sont déjà utilisés, et même s'ils n'avaient pas été optimaux, ils auraient été très proches de l'optimum. Le résultat est néanmoins important sur le plan théorique et constitue une élégante application des formes modulaires.

Sean Bailly

M. Viazovska, sur arXiv, 2016 : http://arxiv.org/abs/1603.04246
H. Cohn et al., sur arXiv, 2016 : http://arxiv.org/abs/1603.06518

Science et société

Perturbateurs endocriniens : un flou entretenu

En 2013, la Commission européenne (CE) devait fournir des critères d'identification des perturbateurs endocriniens, ces substances qui perturbent le système hormonal, afin que les lois sur les pesticides (2009) et les biocides (2012) puissent entrer en vigueur. Elle ne l'a toujours pas fait, prétextant un manque de consensus scientifique et la nécessité d'une étude d'impact – deux mauvaises excuses, expliquent dans un article sept chercheurs indépendants, dont Barbara Demeneix, professeure au Muséum national d'histoire naturelle.

Qu'est-ce qui vous a poussés à agir ?

Barbara Demeneix : En juin 2014, au lieu de définir ses critères, la CE a publié une feuille de route proposant quatre options pour identifier les perturbateurs endocriniens et planifiant une étude des impacts économique, social et environnemental potentiels de chacune, afin d'aider à en choisir une. C'est la présentation de ce programme, le 1er juin 2015 à Bruxelles, qui a tout déclenché. Nous étions plusieurs représentants de l'*Endocrine Society* inscrits et avons tous été choqués par l'annonce de cette étude d'impact. Il était clair que la réunion était montée pour montrer qu'il n'existait pas de consensus sur la définition des perturbateurs endocriniens, et qu'il était difficile d'en définir des critères d'identification. Or il existe bien un consensus scientifique ! Et aucune étude d'impact n'y changera rien. Nous avons donc décidé d'écrire cet article.

Quel est votre message ?

B. D. : Il est triple. D'abord, nous montrons qu'il y a consensus sur la définition donnée par l'Organisation mondiale de la santé en 2002 : « Une substance ou un mélange exogène qui modifie la/les fonction(s) du système endocrinien et qui, en conséquence, a des effets nocifs sur la santé d'un organisme intact, de sa descendance ou des (sous-)populations. » Cette définition est celle utilisée depuis et n'a jamais, à notre connaissance, été remise en question. Même la feuille de route de la CE se réfère au « consensus général » sur cette définition !

Ensuite, lors de la réunion, la notion toxicologique de puissance, c'est-à-dire d'activité en fonction de la concentration, a pris une importance déplacée. Ce terme est imprécis et n'est pas pertinent pour définir les perturbateurs endocriniens et leurs dangers, plusieurs études ayant montré que leur effet n'est pas toujours proportionnel à la dose.



Barbara Demeneix, professeure au MNHN, à Paris

Enfin, nous montrons que l'étude d'impact est un non-sens quand il s'agit, comme ici, d'évaluer un danger, et non un risque. En particulier, il n'existe pas assez de tests. Ainsi, pour évaluer les effets des pesticides sur le développement du cerveau, aucun test n'est encore ratifié par l'OCDE. Impossible d'étendre à d'autres produits, par exemple, l'étude que nous avons menée en 2015 avec Leo Trasande sur l'impact de la perte de QI liée à l'exposition à des organophosphates. Sans compter que les effets de la plupart des pesticides sur le neurodéveloppement n'ont pas été testés.

Que préconisez-vous pour réglementer les perturbateurs endocriniens ?

B. D. : De les classer en trois catégories en fonction du niveau de preuve, comme cela est fait pour les substances cancérigènes. Il s'agit de la 3e option de la CE, et nous montrons qu'elle remplit tous les critères recherchés.

La CE a-t-elle réagi ?

B. D. : Absolument pas. Pourtant, à Berlin, d'autres sont arrivés à la même conclusion depuis. La CE se préparerait-elle à changer la loi, afin qu'elle ne repose plus sur le danger mais sur le risque, bien moins contraignant car autorisant des seuils ? Nous le craignons, car c'est ce que visent le CEFIC et l'EPCA, les lobbies européens de la chimie et de l'industrie des pesticides, comme le dénonce la journaliste Stéphane Horel dans son livre *Intoxication*.

Marie-Neige Cordonnier

R. Slama et al., EHP, 2016

Anthropologie

Un bassin féminin de taille modulable

Selon l'explication courante, la taille du bassin féminin serait génétiquement déterminée. En fait, elle augmente à l'adolescence et diminue à la ménopause, ce qui suggère que cette taille varie aussi sous l'influence des hormones et de l'environnement.



La taille du bassin de la femme varie au cours de sa vie. Il s'élargit à partir de la puberté, ce qui rend possible l'accouchement, puis se rétrécit après la ménopause, ce qui améliore la stabilité du plancher pelvien. Des transformations sous dépendance hormonale.

À la puberté, le bassin féminin s'élargit ; après la période de fécondité de la femme, il rétrécit. En comparaison, le bassin masculin évolue peu au cours de la vie. C'est ce qu'a constaté une équipe de l'université de Zurich dirigée par Marcia Ponce de León. Son étude éclaire la question du « dilemme obstétrique » qui intrigue les chercheurs depuis longtemps.

De quoi s'agit-il ? Dans notre espèce, accoucher est particulièrement difficile à cause de l'étroitesse du bassin. Pourquoi les femmes n'ont-elles pas un plus large bassin ? L'explication courante est que l'évolution aurait conduit à un compromis entre les nécessités obstétriques – le passage d'un bébé dont la tête est volumineuse – et celles de la locomotion. Ainsi, le bassin féminin n'aurait pas pu évoluer vers une forme plus évasée parce que la marche en aurait été entravée.

Toutefois, plusieurs travaux de recherche récents ont fait apparaître que les femmes au bassin large marchent aussi bien que celles au bassin plus étroit. C'est pourquoi l'équipe de Marcia Ponce de León a cherché une nouvelle explication aux difficultés obstétriques qu'entraîne la forme du bassin féminin.

Les chercheurs se sont procuré 275 tomographies de bassins d'enfants, d'adolescents et d'adultes féminins et masculins. Après avoir défini 377 caractéristiques ostéologiques, ils ont examiné l'évolution en cours de vie des trois composantes principales (combinaisons de caractéristiques) décrivant le mieux le développement du bassin d'un point de vue statistique.

Ils ont alors découvert que si les bassins des filles et des garçons se développent de la même façon jusqu'à la puberté, à ce moment, le bassin féminin emprunte une autre trajectoire : il s'élargit jusqu'à atteindre un optimum vers l'âge de 25 ans, au pic de fertilité. Après 40 ans, en revanche, il régresse un peu et recommence à évoluer comme le bassin masculin.

Les chercheurs zurichois font l'hypothèse qu'il existe bien une limite maximale à la taille du bassin, non pas pour des raisons de locomotion, mais pour la nécessaire stabilité du plancher pelvien (le périnée). Ainsi, le développement spécifique du bassin féminin répondrait à deux contraintes opposées : la première obstétrique ; la seconde organique. Pendant la période de fertilité, l'élargissement du bassin faciliterait l'accouchement. À la ménopause, son rétrécissement favoriserait la solidité du plancher pelvien. Et cette transformation serait sous influence hormonale.

Or les conditions de vie de la femme, notamment son alimentation, influent sur la sécrétion des hormones. Ainsi, selon Marcia Ponce de León, les difficultés à l'accouchement seraient peut-être moins imputables à l'évolution qu'à l'influence de facteurs extérieurs sur les hormones féminines, lesquelles jouent à leur tour sur la largeur de la cavité pelvienne et le développement prénatal du bébé.

François Savatier

PNAS, en ligne le 25 avril 2016



Biochimie

Un élément clé de l'ARN formé sur les comètes ?

Pour la première fois, une équipe internationale comprenant des chercheurs de l'Institut de chimie de Nice, de l'Institut d'astrophysique spatiale à Orsay et du synchrotron Soleil a montré que les conditions qui règnent sur une comète permettent la synthèse de ribose, un sucre qui sert de « colonne vertébrale » à l'ARN.

Le milieu cométaire semble propice à de nombreux processus chimiques d'où naissent des composés chimiques indispensables à la vie telle que nous la connaissons. De nombreuses observations confirment la présence d'acides aminés (constituants des protéines) et de bases azotées (éléments des acides nucléiques tels l'ADN et l'ARN) sur des comètes glacées.

Pour étudier en détail les réactions chimiques qui s'y déroulent, on recrée artificiellement dans des enceintes les conditions régnant à la surface des comètes. À l'Institut d'astrophysique spatiale, les chercheurs ont introduit dans une enceinte à basse température (78 kelvins) et faible pression (10^{-7} millibar) des molécules d'eau, de méthanol (CH_3OH) et d'ammoniac (NH_3), un mélange que l'on retrouve sous forme de glace sur les grains de poussière qui se sont agglutinés pour former les comètes. Le mélange glacé a ensuite été soumis à un rayonnement ultraviolet similaire à celui qui baignait le disque protoplanétaire qui a donné le Système solaire. Ce rayonnement apporte l'énergie qui amorce des réactions chimiques entre les composants. L'enceinte a ensuite été chauffée jusqu'à température ambiante pour simuler ce qui se passe lorsqu'une comète se rapproche du Soleil.

Les chercheurs ont analysé le contenu des échantillons à l'Institut de chimie de Nice. Un grand nombre de molécules organiques ont été détectées, dont le ribose. Il reste à confirmer ce résultat en détectant des traces de ribose dans les glaces d'une comète !

S. B.

C. Meinert et al., Science, 8 avril 2016




En laboratoire, de la glace, mélange d'eau, d'ammoniac et de méthanol, est exposée à un rayonnement ultraviolet *(à gauche)* pour reproduire les conditions d'un nuage moléculaire *(à droite, les Piliers de la création)*.

Un paralysé aux commandes

Chez nombre de tétraplégiques, les commandes motrices sont correctement élaborées dans le cerveau, mais une lésion de la moelle épinière empêche leur transmission aux muscles. Chad Bouton, de l'institut Battelle Memorial, aux États-Unis, et ses collègues sont parvenus à lire ces commandes directement dans l'encéphale d'un patient à l'aide de microélectrodes, puis à les transmettre à un dispositif de stimulation musculaire. Trois sessions d'entraînement par semaine pendant quinze mois ont été nécessaires pour affiner les algorithmes qui décodaient les mesures cérébrales et les transformaient en instructions pour le stimulateur – composé de 130 électrodes enroulées autour de l'avant-bras. Finalement, le patient a réussi à effectuer quelques gestes du quotidien, comme verser le contenu d'une bouteille dans un verre. Le dispositif reste à perfectionner avant de sortir du laboratoire, mais, pour les chercheurs, son potentiel est désormais prouvé.

Mathématiques

Colorier des cartes avec seulement trois couleurs

Combien de couleurs faut-il pour colorier une carte plane découpée en régions sans que deux zones limitrophes soient de la même couleur ? En 1976, les Américains Kenneth Appel et Wolfgang Haken ont prouvé que quatre couleurs suffisent. Ce résultat est vrai pour toutes les cartes planes, mais existe-t-il des conditions particulières garantissant que seules trois couleurs suffisent ? En 1976, Richard Steinberg a conjecturé que « tout graphe planaire sans cycles de longueurs 4 ou 5 requiert seulement trois couleurs ». Or Vincent Cohen-Addad, de l'École normale supérieure à Paris, et ses collègues viennent de montrer que cette conjecture est fausse.

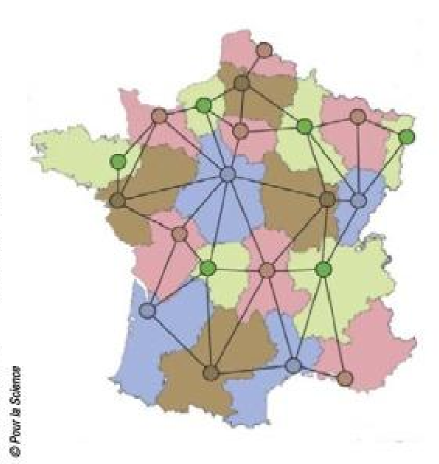
En pratique, pour étudier ce genre de problèmes, les mathématiciens formalisent les cartes à colorier en utilisant la théorie des graphes. Chaque région d'une carte est matérialisée par un nœud qui porte une couleur. Deux régions limitrophes sont donc deux nœuds connectés par une arête. Ces nœuds ne doivent pas porter la même couleur.

Les chercheurs ont remarqué que si un graphe présente des cycles de longueur 4 (boucles à 4 nœuds), il est impossible de n'utiliser que trois couleurs. Il faut donc exclure ces cycles, mais est-ce suffisant ? En 2005, Oleg Borodin, de l'Institut de mathématiques de Novosibirsk, en Russie, et ses collègues ont fourni une première réponse en montrant que les graphes dépourvus de cycles de 4, 5, 6 et 7 nœuds peuvent être coloriés avec trois couleurs.

Vincent Cohen-Addad et ses collègues ont construit un graphe planaire sans cycles de longueurs 4 ou 5 que l'on ne peut pas colorier avec seulement trois couleurs. Ce contre-exemple infirme la conjecture de Steinberg. Et si l'on interdisait aussi les cycles de 6 nœuds ?

S. B.

V. Cohen-Addad et al., sur arXiv, 2016 : https://arxiv.org/abs/1604.05108



En toute généralité, une carte plane découpée en régions peut être coloriée avec quatre couleurs. Certaines conditions supplémentaires assurent que trois couleurs suffisent.

Thermographie d'exoplanète

Brice-Olivier Demory, du laboratoire Cavendish, au Royaume-Uni, et ses collègues ont établi la première carte de température d'une super-Terre, 55 Cancri e, à peine deux fois plus grande que la Terre. Ils ont montré que la face exposée à son étoile a une température d'environ 2 700 kelvins, contre 1 300 kelvins pour l'hémisphère à l'ombre. La planète n'a pas d'atmosphère, sinon la circulation de celle-ci aurait atténué la différence de température. En outre, une zone très chaude sur la face éclairée pourrait correspondre à un océan de magma.

Les poussières du Sahara

Les vents du Sahara dispersent des poussières qui influent sur le climat. Cyrille Flamant, du laboratoire LATMOS à Guyancourt, et ses collègues ont mis en relation une analyse statistique des données sur les vents avec la carte des dépôts de poussières. Ces chercheurs montrent ainsi que le transport de ces dernières est corrélé avec la topographie du désert et avec des épisodes météorologiques majeurs tels que El Niño. Leur étude prévoit qu'au cours du XXIe siècle, le transport des poussières sahariennes se réduira, ce qui aura des conséquences notables sur le climat.

Cancer du sein et mutations

Jusqu'à présent, seules les mutations dans une petite partie du génome ont été étudiées en rapport avec les cancers du sein. Une équipe internationale, codirigée par Gilles Thomas, de la fondation Synergie Lyon Cancer, a séquencé le génome entier de 560 tumeurs du sein. Plus de 1 600 mutations suspectées d'être à l'origine du développement d'un cancer ont ainsi été cataloguées. Elles concernent diverses parties du génome. Cinq nouveaux gènes identifiés ou confirmés seraient impliqués dans la formation d'une tumeur. Des résultats qui ouvrent la voie à de meilleurs diagnostics.

Océanographie

Un récif corallien sous la boue amazonienne



À l'embouchure du fleuve Amazone, l'eau est boueuse. Des conditions *a priori* peu favorables au développement d'un récif corallien, et pourtant !

© Modis/Nasa

Les récifs coralliens riment avec eaux turquoise, poissons multicolores et destinations tropicales ; des images bien lointaines de la réalité de celui découvert à l'embouchure de l'Amazone par Rodrigo Moura, de l'université de Rio de Janeiro, et ses collègues.

Cette vaste structure calcaire, qui s'étend sur 1 000 kilomètres de la pointe nord-est de la Guyane française jusqu'aux côtes de l'État brésilien du Maranhão, ne se situe pas dans une zone propice au développement du corail : la lumière du soleil lui est cachée par un panache de boue et la salinité, nécessaire à sa croissance, y est faible. Bien que moins diversifié que ses homologues classiques, le récif amazonien héberge une grande variété d'éponges, de coraux, d'algues et de poissons. Ces espèces ont su s'adapter à l'opacité de l'eau et surtout, selon leurs besoins, coloniser une partie de l'écosystème. La biodiversité évolue en fonction de la lumière reçue en ses différentes régions ; les organismes photosynthétiques se développent au sud, où l'eau est moins trouble, tandis que les éponges dominent au nord.

Alors que les coraux tropicaux dépérissent sous l'effet du changement climatique, cet écosystème inattendu pourrait amener à réfléchir sur leur évolution… en espérant qu'il ne soit pas lui-même détruit par les exploitations pétrolières de la région.

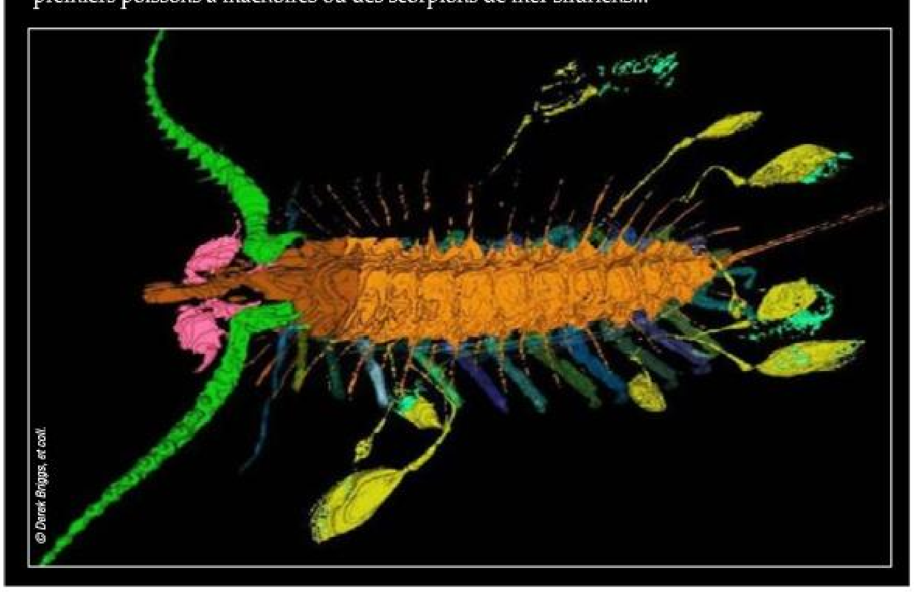
Alice Maestracci

R. Moura et al. Science Advances, en ligne le 22 avril 2016

Insolite

Les cerfs-volants d'*Aquilonifer spinosus*

Pourquoi un animal vivant dans la mer traînerait-il au bout de petits fils ce qui ressemble à des cerfs-volants ? Parce que ce sont ses enfants, et qu'il y a 450 millions d'années, au Silurien, il valait mieux que ce cousin des trilobites nommé *Aquilonifer spinosus* les garde près de lui le temps qu'ils aient grandi. Une façon de les protéger des premiers poissons à mâchoires ou des scorpions de mer siluriens…

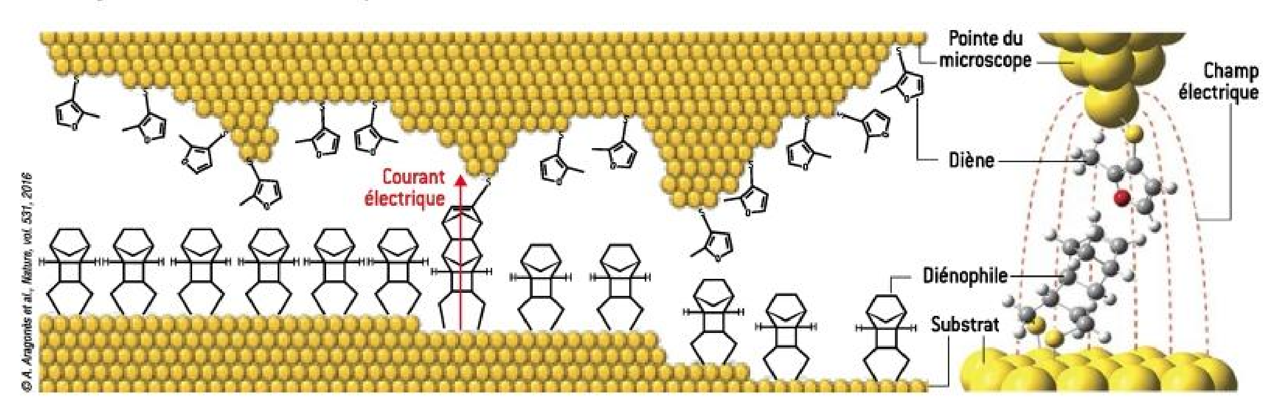


© Derek Briggs, et coll.

Chimie

Catalyser avec un champ électrostatique

Pour améliorer le rendement des réactions chimiques, on connaissait trois processus catalytiques. Une expérience où l'on utilise la pointe d'un microscope à effet tunnel a confirmé l'existence d'un quatrième.



Entre la pointe du microscope *(ci-dessus à droite)* et la surface conductrice s'établit un champ électrique qui accélère la réaction entre les molécules diénophiles fixées sur la surface conductrice et les diènes adsorbés sur la pointe. Lorsque la réaction s'opère, un faible courant circule entre la surface et la pointe. En réalité, la pointe a une forme plus étalée et des milliers de diènes sont fixés dessus *(à gauche)*.

Un simple champ électrostatique serait-il en mesure de remplacer les catalyseurs chimiques complexes et onéreux utilisés pour accélérer les réactions chimiques ? C'est ce que proposent Michelle Coote, de l'université de Barcelone, et son équipe. Cette nouvelle forme de catalyse compléterait ainsi les trois types de processus catalytiques déjà connus, à savoir la catalyse chimique, la catalyse enzymatique et la photocatalyse.

Dès 2004, des études théoriques avaient prédit qu'un champ électrostatique peut modifier la répartition des électrons entre les atomes au sein des molécules, favorisant ainsi la rupture de liaisons chimiques, ou la création de nouvelles. Néanmoins, pour que cet effet serve à faciliter des réactions, il faut que les molécules des réactifs soient orientées précisément dans le champ électrique – ce qui est difficile à réaliser lorsqu'elles sont dispersées dans un solvant.

L'équipe de Michelle Coote a étudié l'influence d'un champ électrostatique sur la vitesse d'une réaction de type Diels-Alder, durant laquelle deux liaisons sont créées simultanément entre un substrat (nommé diénophile) et un réactif (un diène, une molécule d'hydrocarbure contenant deux doubles liaisons). Afin de contrôler l'orientation des molécules dans le champ, ils ont choisi de l'imposer à l'échelle moléculaire à l'aide d'un microscope à effet tunnel. Cette technique repose sur le passage d'un courant très faible entre un matériau conducteur et une fine pointe qui en balaie la surface, et permet de contrôler précisément le champ électrique entre les deux.

Les chercheurs ont fixé des molécules diénophiles sur une surface conductrice afin de les préorienter, et ont greffé des diènes sur la pointe du microscope. Celle-ci est abaissée sur la surface, ce qui met en contact substrat et réactif, et impose le champ électrique. À chaque fois que la réaction se produit, une jonction se crée et un courant s'établit. La pointe est ensuite relevée, le produit de la réaction en est arraché, et elle peut à nouveau être abaissée sur le substrat suivant. Les chercheurs ont ainsi mesuré l'efficacité de la réaction de Diels-Alder avec ou sans champ électrique, en abaissant et relevant la pointe du microscope 6000 fois et en comptant le nombre de fois où le courant s'établit, signe que la réaction a lieu.

En présence d'un champ électrique, les jonctions ont été 4,4 fois plus nombreuses qu'en l'absence de champ, ce qui montre une forte augmentation de l'efficacité de la réaction, donc de sa vitesse globale. Ce résultat est conforme aux modélisations moléculaires théoriques selon lesquelles un tel champ électrostatique abaisse la barrière énergétique à franchir pour que la réaction de Diels-Alder ait lieu.

C'est la première fois qu'est validé de façon expérimentale le concept de catalyse électrostatique. Son applicabilité à l'échelle macroscopique reste encore à explorer, notamment en raison de la question de l'orientation des molécules dans le champ et des effets de solvants, qui peuvent diminuer ou annuler localement le champ électrique extérieur. Néanmoins, pour Michelle Coote, cette nouvelle forme de catalyse offre des perspectives inédites, tant pour l'étude des mécanismes réactionnels que pour la mise au point de nouveaux procédés de synthèse.

Martin Tiano

A. Aragonès et al., Nature, vol. 531, pp. 88-91, 2016

Actualités

Géophysique

Le fer sous pression

Le noyau terrestre est une énigme pour les géologues. Il contient surtout du fer et du nickel, mais aussi des éléments légers qui restent à identifier. Anat Shahar, de l'institut Carnegie pour la science, à Washington, et ses collègues ont étudié en laboratoire le rôle de la pression sur la formation d'alliages ferreux lors de la migration du fer du manteau vers le noyau.

En fonction de la pression, les parts des différents isotopes du fer qui se lient avec les éléments légers (l'hydrogène, le carbone, l'oxygène, etc.) varient. Ces alliages auraient migré vers le noyau en laissant dans le manteau des concentrations isotopiques de fer différentes selon les alliages effectivement formés. En calculant ces concentrations et en les comparant à des échantillons de roche du manteau, les chercheurs ont montré que le noyau ne contient probablement ni carbone ni hydrogène.

S. B.

A. Shahar et al., Science, vol. 352, pp. 580-582, 2016

Psychologie

Préjugés sur la voix des bébés

Les bébés filles ont-elles la voix plus aiguë que les bébés garçons ? Nicolas Mathevon, de l'université de Saint-Étienne, et ses collègues ont analysé la structure acoustique des pleurs de bébés de quatre mois et ont montré que les voix des bébés filles ne sont pas plus haut perchées que celles des garçons. Cependant, ils ont aussi mis en évidence que nous n'hésitons pas à juger nos bébés à l'aune de stéréotypes, même en l'absence de différences avérées entre filles et garçons.

Les chercheurs ont fait écouter les pleurs de ces bébés à des adultes, prévenus qu'il s'agissait soit de garçons, soit de filles. Les auditeurs ont spontanément attribué les cris graves aux garçons et les cris plus aigus aux filles. Ainsi, les adultes appliquent leur connaissance des voix humaines après la puberté à celles des bébés. Par ailleurs, ils ont considéré qu'un même pleur exprimait plus d'inconfort lorsqu'il était présenté comme celui d'un « garçon » que lorsqu'il était attribué à une « fille ». Aurait-on tendance à considérer que les garçons ne pleurent que lorsqu'ils ont vraiment mal ? Et que les filles pleurent pour un rien ? Les stéréotypes sont coriaces !

Catherine Hordelalay

D. Reby et al., BMC Psychology, vol. 4, article 19, 2016

Neurosciences

Comment fonctionne le cerveau des mathématiciens

Cédric Villani, mathématicien lauréat de la médaille Fields *(voir la photographie)*, et autres brillants chercheurs en mathématiques ont-ils un cerveau distinct du nôtre ? Oui, ou du moins, ils ne l'utilisent pas de la même façon que le « novice », selon Marie Amalric et Stanislas Dehaene, du centre NeuroSpin à Paris-Saclay.

Tous deux ont cherché à déterminer l'origine des aptitudes en mathématiques en enregistrant l'activité cérébrale par IRM fonctionnelle de 15 mathématiciens professionnels, comparée à celle de 15 personnes ayant des niveaux d'études semblables mais non expertes en mathématiques. Ils leur ont proposé d'écouter des propositions mathématiques compliquées correspondant à différents domaines (algèbre, analyse, géométrie et topologie), telles « Tout compact convexe d'un espace euclidien est l'intersection d'une famille de boules fermées », ainsi que des phrases complexes dans d'autres thématiques, par exemple « Dans l'Antiquité, en Grèce, un citoyen ne payant pas ses dettes devenait un esclave ». Les participants devaient dire si la proposition était juste, fausse ou dénuée de sens.

Dans le cerveau de tous les participants, les aires associées au langage et à sa compréhension s'activent quand ils réfléchissent aux phrases de culture générale. Et tous répondent correctement à environ deux tiers des propositions. En revanche, quand les sujets tentent d'interpréter les propositions mathématiques, les régions correspondant aux nombres, aux calculs et aux représentations dans l'espace (cortex préfrontal, sillons intrapariétaux, aires temporales inférieures) ne s'activent que chez les mathématiciens, qui donnent des réponses correctes dans 65 % des cas (comparés aux 37 % des non-mathématiciens).

Alors que chez les novices, la « bosse des maths » reste cantonnée aux nombres et aux calculs familiers, celle des experts est aussi dédiée à la réflexion mathématique. Ce qui confirme l'existence de régions cérébrales associées aux mathématiques, et indépendantes de celles traitant le langage.

Bénédicte Salthun-Lassalle

M. Amalric et S. Dehaene, PNAS, en ligne le 11 avril 2016



Les garçons pas si nuls en lecture

Les enquêtes indiquent que les garçons ont de moins bons résultats en lecture que les filles. Mais cela résulterait plutôt d'un blocage psychologique que d'un réel écart de talent, selon Pascal Pansu, de l'université Grenoble-Alpes, et ses collègues. Les chercheurs ont demandé à 80 enfants de repérer des noms d'animaux dans un texte. Quand l'exercice était présenté comme un test de lecture, les garçons réussissaient moins bien que les filles, mais ils les égalaient quand on leur disait qu'il s'agissait d'un jeu.

Une galaxie satellite discrète

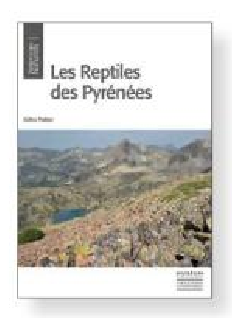
La Voie lactée accueille un nouveau membre parmi ses galaxies naines satellites. Le « club » comprend quelques dizaines de membres. C'est un ordre de grandeur de moins que les prévisions des modèles de formation galactique où l'on prend en compte l'influence gravitationnelle de la matière noire. Mais il y aurait d'autres galaxies satellites discrètes, si l'on en croit les dernières découvertes. L'an dernier, une dizaine de ces objets ont été repérés et une équipe de l'université Cambridge, au Royaume-Uni, vient d'observer Crater 2, une galaxie satellite, la quatrième par sa taille, mais si diffuse qu'elle est très peu brillante.



MUSÉUM

NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

.... biodiversité - reptiles ....



LES REPTILES DES PYRÉNÉES

Gilles **Pottier**

Préface de Juan Pablo **Martínez Rica**

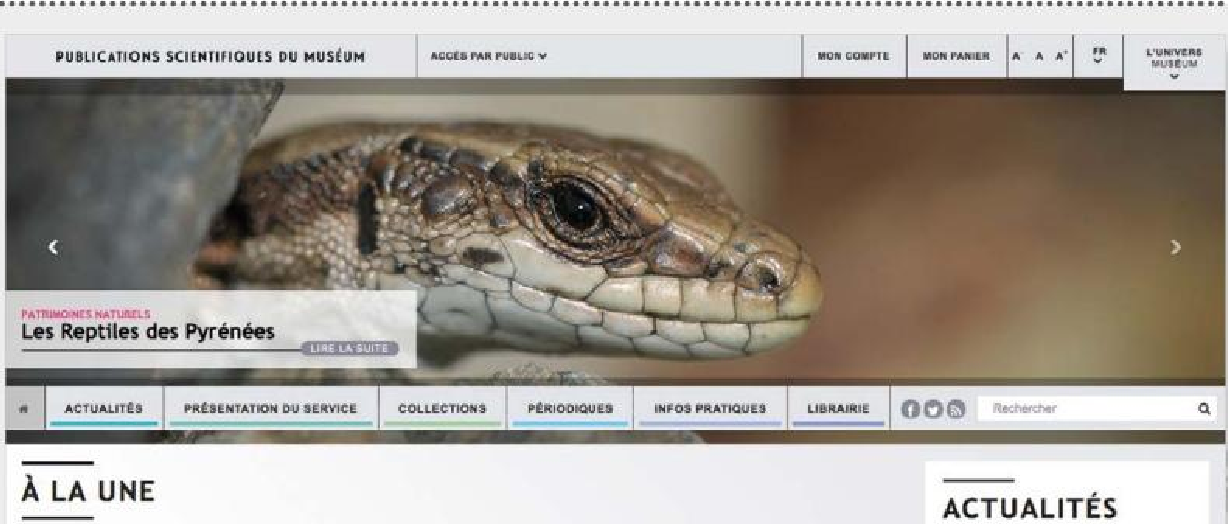


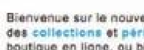
Cette faune herpétologique des Pyrénées est le résultat d'une entreprise naturaliste combinant enquête bibliographique et reportage photographique. Elle propose une vaste synthèse de données relatives à de multiples champs disciplinaires (systématique, taxinomie, biologie, écologie, éthologie, phénologie...) concernant 32 espèces protégées, jusque-là dispersées sur une multitude de supports et concernant les deux versants de la chaîne (Espagne, Andorre et France). Elle offre par ailleurs une iconographie totalement originale, ne figurant que des individus et des habitats photographiés dans les Pyrénées. Ceci pour illustrer au mieux les variations phénotypiques propres à l'aire géographique concernée et les particularités écologiques des reptiles pyrénéens. Des cartes de répartition précises (mailles UTM 10 km × 10 km), reposant sur des sources scientifiques, complètent et éclairent le propos biogéographique. Les espèces et sous-espèces endémiques ou subendémiques de la chaîne, de même que celles qui y ont un statut particulier (très localisées, menacées...), ont fait l'objet d'une attention particulière et les menaces qui pèsent sur ces animaux sont largement exposées.

Cet ouvrage sera précieux pour les naturalistes et gestionnaires d'espaces naturels de la chaîne (parc national, PNR, Natura 2000, réserves...), qui disposeront là d'une mine d'informations sur le sujet.

Collection **Patrimoines naturels**, tome 73 | 210 × 297 mm relié | Texte en français | 352 p., 540 figures coul. | **ISBN** 978-2-85653-786-2 | **Prix** 43 € TTC (40,76 HT) | Juin 2016

plus de renseignements et de contenus sur la librairie en ligne des Publications scientifiques





Bienvenue sur le nouveau site Internet des Publications scientifiques du Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. Vous trouverez ici l'ensemble des collections et périodiques publiés par le Muséum. Les ouvrages et fascicules de périodiques sont maintenant disponibles à la vente, via la boutique en ligne, ou bien en venant directement sur place ; les articles de périodiques, dans leur version intégrale, sont de nouveau consultables en ligne.



Nouvelles parutions : Geodiversitas 38 (1), Zoosystema 38 (1)



Commandez vos ouvrages depuis le **monde entier** sans intermédiaire. Navigation transversale par **Moteur de recherche**, **Thèmes** et **Géozones**.

Téléchargez gratuitement les articles des revues *Geodiversitas*, *Zoosystema* et *Adansonia* (publiés depuis 2000). D'autres revues sont consultables ou référencées...

Composez votre propre sélection en éditant un **catalogue** personnalisé au format PDF (A4).





ÉCLAIRAGE

L'Afrique le pied à l'étrier de la science ?

Alors que le continent africain progresse dans bien des domaines, ses réalisations scientifiques et techniques restent très modestes et invisibles. Mais les acteurs africains se mobilisent et la récente tenue d'un forum mondial à Dakar marque une étape.

Maurice MASHAAL

L'Afrique ne pèse aujourd'hui pas très lourd dans le monde de la science et de la technologie. Alors que sa population représente près du sixième de celle de la planète, la part de ses chercheurs n'est que de 2,4 % du total dans le monde (chiffre de 2013). Et celle de ses publications scientifiques n'atteint que 2,6 % du total *(voir les graphiques page ci-contre)*. Quant aux brevets, ce n'est pas mieux : en 2013, les demandes de brevet soumises au bureau des brevets américain (l'USPTO) et émanant de l'Afrique ne représentaient que 0,1 % du total des soumissions (à comparer avec 17,5 % pour l'Europe et 30,2 % pour l'Asie).

Or on reconnaît généralement que la science et la technologie jouent un rôle majeur dans le développement d'un pays. Aussi, plusieurs acteurs et organisations en Afrique s'efforcent de faire prendre conscience de cet enjeu et d'améliorer la situation du continent dans ces domaines. C'est dans ce contexte que s'est tenu du 8 au 10 mars 2016 à Dakar, au Sénégal, le premier forum mondial de la science en Afrique, organisé par le Next Einstein Forum (NEF), une initiative de l'AIMS (African Institute of Mathematical Sciences) menée en partenariat avec la fondation allemande Robert Bosch.

Cette réunion internationale a rassemblé plusieurs centaines de participants d'Afrique et d'ailleurs, dont des chefs d'État africains, des personnalités du monde scientifique et industriel, des jeunes scientifiques – en particulier 15 lauréats distingués pour leur brillant parcours, ainsi que 54 « ambassadeurs scientifiques » de leurs pays respectifs.

L'initiative Next Einstein Forum (appellation qui traduit le souhait que le prochain Einstein soit un Africain), explique son président Thierry Zomahoun, qui est aussi PDG de l'AIMS, vise notamment à « construire un agenda africain » autour des STIM (science, technologie, ingénierie et mathématiques), à créer une plateforme panafricaine de jeunes scientifiques, à promouvoir une communauté d'échanges, à fournir une cartographie des grands travaux et événements scientifiques se déroulant en Afrique... De façon générale, il s'agit d'accroître la visibilité du continent sur la scène scientifique internationale et de développer dans les domaines de la science et de la technologie le potentiel constitué par les jeunes Africains – lesquels, rappelle Thierry Zomahoun, représenteront 40 % de la jeunesse mondiale en 2050 selon les projections démographiques.

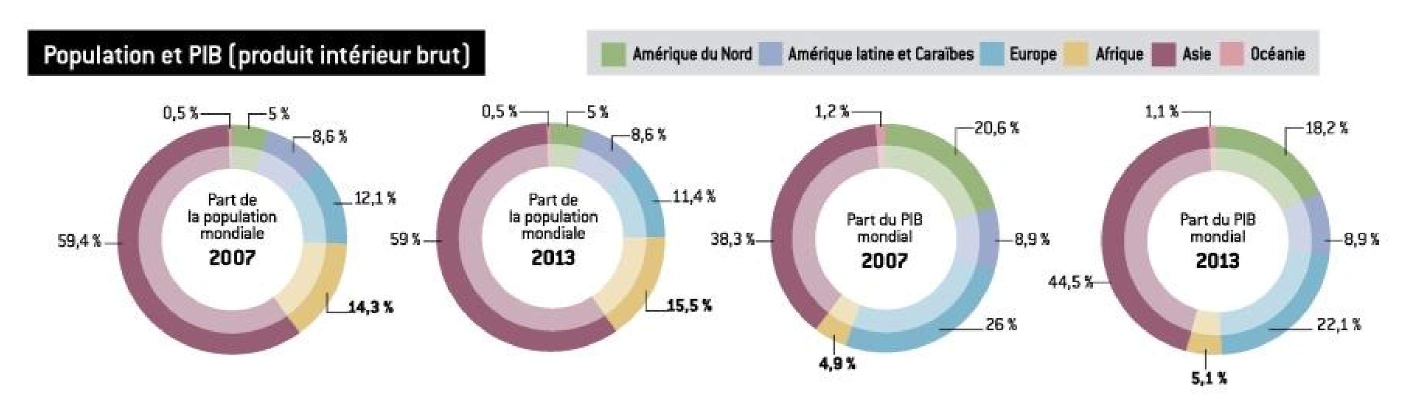
Les actions de l'AIMS, organisation en réseau ayant un grand nombre de partenaires, académiques ou non, sont un exemple de ce qui peut se faire. Créée il y a quatorze ans, l'AIMS a mis en place dans cinq pays (Afrique du Sud, Cameroun, Ghana, Sénégal, Tanzanie) des centres d'excellence de recherche et d'enseignement au niveau master en sciences mathématiques (mathématiques, physique, statistique, économétrie...). Chaque centre – l'AIMS en prévoit 15 à l'horizon 2023 – accueille 50 étudiants par an. Jusqu'ici, 960 diplômés en sont issus, dont 30 % de femmes. Et 70 % d'entre eux sont restés en Afrique, détail qui a son importance étant donné la fuite de cerveaux qui frappe le continent. L'AIMS mène aussi des actions pour la formation des enseignants et pour le renforcement des liens avec l'industrie.

Il existe d'autres initiatives pour promouvoir la science et la technologie en Afrique, notamment des réseaux de collaborations établis par l'Académie africaine des sciences, ou le projet SKA de radiotélescope géant qui sera réparti sur l'Australie et plusieurs pays africains.

Au cours de la réunion internationale du Next Einstein Forum, d'autres actions ont été formalisées, telles que la création d'un centre AIMS au Nigeria ou l'accord entre le NEF et IBM, qui permettra à des boursiers d'être accueillis au titre de visiteurs dans des laboratoires de recherche d'IBM. Le forum a enfin donné lieu à une déclaration dite de Dakar dont les signataires, notamment des chefs d'État et de gouvernement, s'engagent à orienter les systèmes éducatifs vers les STIM, à augmenter les investissements dans la science et la technologie pour atteindre 0,7 % du PIB d'ici à 2020 et 1 % d'ici à 2025 (contre 0,45 % en 2013), de créer un Fonds continental de recherche et de développement, etc. Tous ces engagements seront-ils tenus ? Quels seront leurs fruits ? On le saura probablement au prochain forum en 2018 à Kigali, au Rwanda. ■

Maurice MASHAAL est rédacteur en chef de Pour la Science.

Population et PIB (produit intérieur brut)



Dépenses intérieures de recherche et développement (DIRD)

Part des DIRD mondiales 2007
1,6 %
33,8 %
3,2 %
26,2 %
1,1 %
34 %

Part des DIRD mondiales 2013
1,4 %
28,9 %
3,5 %
22,7 %
1,3 %
42,2 %

Part des DIRD dans le PIB 2007 et 2013

Région	2007	2013
Amérique du Nord	2,57 %	2,71 %
Amérique latine et Caraïbes	0,92 %	1,03 %
Europe	1,58 %	1,75 %
Afrique	0,36 %	0,45 %
Asie	1,39 %	1,62 %
Océanie	2,09 %	2,07 %

0,0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 %

Effectifs de chercheurs

Part de l'effectif mondial 2013
1,6 %
18,5 %
3,7 %
31 %
2,4 %
42,8 %

Nombre de chercheurs par million d'habitants 2013

Région	Chercheurs par million d'habitants
Amérique du Nord	4 034
Amérique latine et Caraïbes	688
Europe	2 942
Afrique	169
Asie	786
Océanie	3 219

0 1000 2000 3000 4000 5000

Publications scientifiques

Part des publications scientifiques dans le monde 2013
4,2 %
28,6 %
5,2 %
39,3 %
2,6 %
39,5 %

Nombre de publications par million d'habitants 2014

Région	Publications par million d'habitants
Amérique du Nord	1 013
Amérique latine et Caraïbes	148
Europe	609
Afrique	29
Asie	118
Océanie	1 389

0 300 600 900 1200 1500

Proportion de femmes parmi les chercheurs

Monde 28,4 %
Union européenne 33,1 %

Tunisie, Maroc, Libye, Égypte, Mali, Sénégal, Gambie, Burkina Faso, Togo, Ghana, Éthiopie, Centrafrique, Cameroun, Gabon, Ouganda, Kenya, Rwanda, Burundi, Tanzanie, Malawi, Mozambique, Angola, Zambie, Zimbabwe, Botswana, Madagascar, Namibie, Afrique du Sud, Lesotho

0-14,9 %
15-24,9 %
25-34,9 %
35-44,9 %
45-54,9 %
Données indisponibles

Chiffres d'après le rapport de l'Unesco sur la science, 2015

ENTRETIEN

Nouveaux OGM : « Le débat est manipulé »

« Nouveaux OGM », « OGM cachés », NPBT... Tous ces noms désignent la même chose : de nouvelles techniques d'obtention des plantes et leurs produits. S'agit-il d'OGM ? Le débat fait rage, mais la question est-elle la bonne ?



Yves BERTHEAU est directeur de recherche à l'Inra, au laboratoire Cesco (UMR 7204 CNRS/MNHN/UPMC) à Paris.

Depuis quelques années, de nouvelles techniques d'obtention des plantes, rassemblées sous le nom de NPBT *(new plant breeding techniques)*, ont émergé, telles que CRISPR-Cas et les nucléases à doigt de zinc, deux systèmes d'édition du génome mis au point récemment. En 2007, la Commission européenne a engagé une réflexion sur ces nouvelles techniques et leur réglementation : entrent-elles dans le cadre de la législation des OGM (organismes génétiquement modifiés) ou non ? Si tel est le cas, chaque plante produite doit faire l'objet d'une autorisation, après évaluation, et d'un étiquetage.
Début 2016 en France, cette question a plongé le Haut conseil des biotechnologies (HCB) dans une crise profonde. L'éclairage d'Yves Bertheau, chercheur Inra au Muséum national d'histoire naturelle et récent démissionnaire du comité scientifique du HCB.

POUR LA SCIENCE
Pourquoi avez-vous démissionné du HCB ?

YVES BERTHEAU : Pour trois raisons. D'abord, il y a eu un détournement de procédure. Le HCB a été créé en 2009 pour « éclairer de manière indépendante le gouvernement sur toutes questions intéressant les OGM ou toute autre biotechnologie ». Habituellement, à la suite d'une saisine ministérielle ou d'une autosaisine, le comité scientifique du HCB émet un avis sur la question soulevée, fondé sur une expertise scientifique, puis le comité économique, éthique et social, l'autre instance du HCB, s'appuie sur cet avis pour émettre le sien sur les aspects socioéconomiques. Or c'est un tout autre scénario qui s'est déroulé au sujet des NPBT.

L'ordre du jour de la séance du 16 décembre 2015 prévoyait une rapide discussion sur une note de synthèse d'un groupe de travail interne au comité scientifique, mis en place trois ans plus tôt pour réfléchir à ces nouvelles techniques. Lors de la séance, on nous a expliqué que cette note devançait une saisine du gouvernement qui devait arriver fin janvier. Mais, peu après, le texte a été transmis au gouvernement sous la forme d'un avis, alors qu'il n'en avait aucun des critères juridiques et de qualité. Ce n'était qu'une note de travail ! Nous avons aussi appris que le comité économique, éthique et social avait reçu ce texte en même temps que nous pour émettre son avis. La saisine, quant à elle, n'est jamais arrivée, pas plus qu'une autosaisine. Nous n'avons donc jamais su ce qui nous était demandé. Mais cela n'a pas empêché le gouvernement de se référer plusieurs fois à cette note, qui conclut, en substance, que plusieurs techniques ne devraient pas faire l'objet d'une étude systématique calquée sur le modèle des OGM.

PLS
L'avis publié est donc de qualité médiocre ?

Y. B. : Il est très mauvais, c'est la deuxième raison de ma démission. Je ne pouvais le cautionner. Un vocabulaire et un français approximatifs, de nombreuses incohérences, des points cruciaux évacués dans des fiches techniques non fournies... Et enfin, une orientation plus socioéconomique que scientifique. Le groupe de travail n'a apparemment auditionné que des porteurs d'intérêt, qu'il ne nous est même pas permis de connaître. Aucun scientifique au front dans les domaines concernés ne paraît avoir été contacté. Au lieu d'un rapport scientifique, on se retrouve avec un galimatias. Il faut dire que le bureau du HCB, qui nomme les membres des groupes de travail, a choisi de faire majoritairement appel à des personnes ayant un lien avec le développement économique de ces nouvelles techniques, et même pas du secteur végétal. Un comble pour un rapport qui annonce se préoccuper des plantes.

PLS
Quelle est la troisième raison de votre départ ?

Y. B. : Les fiches techniques n'ont été fournies que mi-janvier, car elles étaient « en cours d'élaboration » en décembre. Bien qu'elles constituent plus des deux tiers de la note, le bureau du HCB n'a

proposé aucune séance pour les discuter avant l'envoi du texte au gouvernement. Or ces fiches ressemblent plus à des pages Wikipedia qu'à des documents d'experts scientifiques. Elles se contentent de décrire succinctement les différentes techniques abordées, sans aucun recul. L'ensemble aboutit à une note qui ne traite que de certaines techniques, voire de certaines variantes, parfois seulement dans quelques situations, et qui ne les regarde que par le petit bout de la lorgnette.

PLS

Quelles techniques ne sont pas abordées ?

Y. B. : Le problème n'était certes pas simple au départ. Le terme NPBT regroupe de nombreuses techniques qui n'ont pas grand-chose à voir entre elles. Celles fondées sur l'édition du génome à l'aide d'enzymes sont les plus médiatisées, car elles prennent leur essor depuis peu : des enzymes (nucléase à doigt de zinc, nucléase TALEN, système CRISPR-Cas) reconnaissent des séquences spécifiques d'ADN et les coupent pour y insérer ou non un fragment d'ADN. Mais les NPBT incluent aussi les greffes entre greffon OGM et porte-greffe non OGM ou *vice versa*, ainsi que l'agro-infiltration (une bactérie *Agrobacterium tumefaciens* injecte de l'ADN étranger dans une cellule végétale, qui le traduit en protéines, puis le détruit) et bien d'autres techniques *(voir l'encadré page 19)*.

Cela donne un ensemble très confus, dont le groupe de travail n'a pas fourni un aperçu exhaustif et surtout compréhensible. Il a par exemple éludé les méganucléases, des enzymes qui reconnaissent et coupent une séquence plus longue et plus rare que les nucléases ou le système CRISPR-Cas. Et concernant l'agro-infiltration, il s'est restreint à son application en milieu confiné, alors que les opérateurs souhaitent l'utiliser en champs, par aspersions aériennes. Il a aussi « oublié » d'autres techniques comme le *floral dip* (une technique de transformation par trempage des tissus végétaux dans une solution de bactéries).

PLS

Quelle est la différence entre ces nouvelles techniques et les méthodes utilisées pour obtenir ce que la législation nomme OGM ?

Y. B. : Selon la directive 2001/18 de la Commission européenne, un OGM est « un organisme, à l'exception des êtres humains, dont le matériel génétique a été modifié d'une manière qui ne s'effectue pas naturellement par multiplication et/ou par recombinaison naturelle ». Et toujours selon cette directive, les techniques qui y conduisent sont les méthodes classiques de transgenèse, c'est-à-dire de transformation du patrimoine génétique d'un organisme en introduisant un gène d'une autre espèce, qu'elle soit apparentée ou non. Ce gène exogène est inséré dans l'organisme cible au moyen de bactéries, d'une micro ou macro-injection, d'une encapsulation ou de bombardements de particules. D'autres techniques non naturelles sont aussi répertoriées dans la directive européenne.

Fondamentalement, il n'y a donc pas grande différence entre les techniques nouvelles et les classiques au regard de la définition législative européenne : toutes conduisent à un organisme dont le matériel génétique a été modifié de façon artificielle – un OGM. Et à chaque fois, un fragment d'ADN ou d'ARN est introduit et/ou circule dans l'organisme cible.

PLS

Pourtant, le groupe de travail penche plutôt vers l'idée que les organismes produits avec les nouvelles techniques ne devraient pas être soumis à la même évaluation que les OGM. Sur quels arguments s'appuie-t-il ?

Y. B. : Le groupe de travail considère par exemple – ce qui est vrai – que les nouvelles techniques d'édition du génome (CRISPR-Cas, nucléases...)



© Stoonn/Shutterstock.com

PAR QUELLE TECHNIQUE CE MAÏS A-T-IL ÉTÉ OBTENU ? Si la Commission européenne décide que les nouvelles techniques de modification des plantes ne nécessitent pas la même procédure de suivi et d'étiquetage que celles produisant les OGM classiques, rien ne le distinguera, sur le plan réglementaire, d'un maïs naturel... Verdict prévu fin 2016.

Des champignons de Paris CRISPR-Cas

En avril 2016, le Département américain d'agriculture (USDA) a autorisé la commercialisation d'un champignon de Paris modifié *via* la technique CRISPR-Cas pour qu'il résiste au brunissement. De fait, la réglementation américaine ne vérifie que si une nouvelle plante est invasive, ce qui n'est pas le cas du champignon obtenu. En mars 2016, le GAO (la Cour des comptes américaine) a rappelé à l'USDA qu'il doit revoir l'évaluation de ces nouveaux produits – révision promise depuis 2008. En attendant, le champignon de Paris américain sera-t-il bientôt dans nos assiettes ?

sont plus précises que les techniques classiques, car elles agissent à un endroit donné du génome, choisi au préalable, et non au hasard. Se focalisant uniquement sur la région ciblée et sur certaines variantes des techniques, il avance aussi que ces techniques seraient moins perturbatrices. Pour lui, une plante modifiée avec un gène de la même espèce ou d'une espèce proche n'aurait pas besoin d'une évaluation calquée sur celle des OGM. Cette vision est, au minimum, simpliste ! Le groupe de travail omet ainsi de nombreuses sources de mutations et d'épimutations (modifications épigénétiques).

Même si elles sont plus précises, les techniques d'édition entraînent des dommages collatéraux. D'autres portions du génome que celles ciblées sont ainsi modifiées, sans que l'on comprenne toujours pourquoi ou que l'on puisse toujours en prédire l'existence. Ces effets hors cibles n'apparaissaient pas dans la première version de la note, et ne sont à présent évoqués que par le biais des progrès techniques en cours qui visent à les réduire et devraient les rendre insignifiants… un jour.

De plus, les effets de la vectorisation des produits utilisés pour la modification des organismes hôtes sont éludés. Or les vecteurs utilisés, qu'il s'agisse de bactéries, de particules ou même d'une micro-injection, sont destructifs comme un bulldozer qui essaierait de venir faire de la dentelle dans votre cuisine : le stress induit laisse des traces incontrôlées, sous forme de mutations et d'épimutations. De même, les effets des systèmes de sélection des cellules transformées sont oblitérés.

PLS

À propos des greffes, le groupe de travail conclut que « les fruits ou graines de plantes non génétiquement modifiées mais issus de porte-greffes modifiés ne nécessitent pas d'évaluation environnementale ou sanitaire propre ». Le porte-greffe modifié n'a-t-il donc aucun effet sur le greffon ?

Y. B. : Il peut en avoir ! Lors d'une greffe, des micro-ARN circulent entre le porte-greffe et le greffon et induisent parfois des épimutations dans la plante entière. L'analyse du groupe de travail est ici malhonnête, d'autant plus qu'il ne considère que l'un des deux cas de greffe (porte-greffe modifié et greffon non modifié, et non l'inverse).

De même, le groupe de travail occulte l'effet de la régénération des plantes modifiées. D'une part, on ne sait pas régénérer toutes les plantes, et les NPBT, tout comme les techniques d'obtention des OGM classiques, ne serviront qu'aux plantes que l'on sait régénérer. D'autre part, le procédé n'est pas anodin : une fois les modifications produites avec certaines NPBT sur des cellules de feuilles – des protoplastes –, on cultive ces cellules dans un milieu optimisé, en présence de phytohormones qui permettent la régénération d'une plante entière mais induisent des variations génétiques incontrôlées.

Il n'y a pas grande différence entre les techniques nouvelles et les classiques au regard de la définition législative européenne

PLS

On entend dire que les plantes obtenues par édition du génome ne sont plus détectables, à cause de l'absence de transgène. Est-ce vrai ?

Y. B. : C'était un autre argument avancé dans le document de départ du groupe de travail pour justifier le fait que les NPBT ne pouvaient pas entrer dans la même législation que les techniques d'obtention des OGM. Mais le groupe confondait ici détectabilité et identification. Détecter des mutations, on sait faire : il existe toute une liste de méthodes utilisées pour cela, notamment dans le domaine médical, en particulier la LCR (*ligase chain reaction*) qui permet de détecter une mutation ponctuelle. La vraie question est l'identification de la technique à l'origine de cette mutation. Le groupe n'y avait même pas songé. En trois ans, il n'a pas interrogé l'ENGL, le réseau européen des laboratoires de détection des OGM, un consortium officiel qui traque les OGM connus et inconnus depuis plus de quinze ans.

PLS

Comment identifie-t-on un OGM inconnu ?

Y. B. : Si on ne recherche qu'une mutation ponctuelle, on ne peut rien dire sur son origine, naturelle ou artificielle. Mais la traçabilité ne se résume pas à la recherche d'une signature univoque, comme les fragments de bordure d'un OGM classique – des séquences qui encadrent la région modifiée du génome. Il s'agit de rassembler des faisceaux convergents de preuves pour aider les douanes ou la répression des fraudes à prendre une décision dont l'impact économique peut être considérable, comme de renvoyer des tonnes de riz ou de produits dérivés, représentant des millions d'euros, parce que ce riz contient des OGM inconnus et non autorisés.

La méthode la plus utilisée, car la moins chère, est la traçabilité documentaire. Quand un semencier vend un produit à un agriculteur, il lui fournit un certificat, que celui-ci transmet à sa coopérative, laquelle en garde une trace que chacun se transmet. L'autre méthode consiste à rechercher des signatures laissées intentionnellement ou non dans le génome des plantes, par exemple par les pétitionnaires – les producteurs d'OGM. Comme ils ont besoin de prouver que tel maïs OGM utilisé par tel agriculteur vient de chez eux, ils peuvent introduire une signature moléculaire dans leurs plantes modifiées : des mutations neutres à certains endroits. Plus généralement, les laboratoires recourent à l'approche dite matricielle, déjà utilisée pour caractériser certains cancers (tous les éléments suspects dans le génome sont rassemblés, et le profil obtenu, analysé au moyen d'outils d'aide à la décision, indique si la plante étudiée est un OGM ou non). Toutes ces méthodes sont applicables aux NPBT. En disant que leur identification est impossible, le groupe de travail se base donc sur un *a priori* biaisé – tout comme cela a été le cas il y a vingt ans pour les OGM.

PLS

Les plantes obtenues *via* des NPBT sont-elles plus dangereuses ?

Y. B. : On ne peut rien dire de plus que pour les OGM classiques. Seule une étude approfondie au cas par cas et sur le long terme permet d'avoir une idée des effets d'une nouvelle plante, qu'elle soit génétiquement modifiée ou non, sur la santé ou la biodiversité. C'est un peu le sens de l'annexe 1B de la directive 2001/18, qui exclut des techniques OGM la mutagenèse au hasard, car les variétés qui en étaient issues étaient utilisées depuis longtemps. Et c'est dans cette annexe que certains voudraient mettre les NPBT. Mais en omettant de dire qu'on manque de recul sur les plantes produites *via* ces

LES NPBT SELON LA COMMISSION EUROPÉENNE

■ **LA MUTAGENÈSE DIRIGÉE PAR OLIGONUCLÉOTIDE** : on injecte dans la cellule végétale un fragment d'ADN simple brin (un oligonucléotide) complémentaire d'une séquence d'ADN de la cellule, mais portant une zone mutée. Le fragment se colle à son complément, ce qui permet l'introduction de la zone mutée dans le génome de quelques cellules filles, que l'on sélectionne.

■ **L'ÉDITION DU GÉNOME CIBLÉE PAR NUCLÉASE** (doigt de zinc, TALEN, CRISPR-Cas) : une enzyme reconnaît une séquence spécifique d'ADN et la coupe pour y insérer ou non un fragment d'ADN.

■ **LA CISGENÈSE ET L'INTRAGENÈSE** : on insère, dans le génome d'une espèce, un fragment d'ADN respectivement intact ou remanié provenant de la même espèce ou d'une espèce sexuellement compatible.

■ **LA GREFFE** : on effectue une greffe classique, mais entre un greffon OGM et un porte-greffe non OGM, ou inversement.

■ **L'AGRO-INFILTRATION** : une bactérie *Agrobacterium tumefaciens* injecte de l'ADN étranger dans une cellule végétale, qui le traduit en protéines, puis le détruit sans l'intégrer dans son génome.

■ **LA MÉTHYLATION DE L'ADN DÉPENDANTE D'UN ARN** : on modifie l'ADN d'une cellule végétale sans changer sa séquence (modification épigénétique) à l'aide d'un ARN étranger afin de changer l'expression d'un gène.

■ **LA SÉLECTION INVERSE** : on produit, à partir d'une plante hybride et à l'aide de rétrocroisements, deux lignées pures complémentaires qui reconstitueront cet hybride, débarrassé des (épi)mutations indésirables. Pour cela, on introduit des gènes qui modifient les processus de reproduction de la plante. Ces gènes sont ensuite éliminés par sélection dans les lignées pures obtenues.

■ **LA BIOLOGIE DE SYNTHÈSE** : on synthétise des ADN et ARN en laboratoire, et on remplace au moins une partie du génome d'un organisme.

techniques, comme l'a justement souligné le comité économique du HCB dans son avis.

PLS

Que préconisez-vous ? Faut-il revenir à la législation de 1997, qui stipulait que tout aliment non consommé de manière courante dans l'Union européenne avant 1997 devait faire l'objet d'un suivi et d'un étiquetage ?

Y. B. : C'est le minimum qu'on puisse proposer : une période probatoire de dix ans, qui permettrait d'examiner les dossiers de ce que je considère de toute façon comme des OGM, de peaufiner les méthodes et d'en savoir plus sur les mutations et épimutations produites par les NPBT, ainsi que sur leur persistance, afin de les encadrer de la façon la plus stricte possible. Je ne suis pas anti-OGM. Je suis phytopathologiste imprégné de la culture de la station d'amélioration des plantes de Dijon. Notre idée est de nourrir au mieux le monde. Si l'on n'avait pas sélectionné de plantes, le blé mesurerait toujours 2,50 mètres et verserait sous le vent. Il ne s'agit donc pas de revenir aux espèces sauvages et de perdre tout ce que l'on a acquis, mais de permettre la coexistence de différentes formes d'agriculture. Pourquoi l'Europe contraint-elle autant les semences paysannes (constituées de populations plutôt que de variétés pures hybrides), mais cherche-t-elle à autoriser l'utilisation de NPBT sans régulation ? Quelle que soit la technique employée, classique ou nouvelle, les contrôles et le suivi restent indispensables. Surtout, le consommateur doit continuer à bénéficier du libre choix au travers d'un étiquetage approprié.

PLS

Un monde où coexisteraient des cultures issues des techniques classiques et nouvelles serait-il envisageable ?

Y. B. : C'est la grande question. De combien de kilomètres séparer ces cultures pour qu'il n'y ait pas de contamination ? Prenez le maïs, l'espèce la plus étudiée à ce sujet. Environ 95 % des grains de pollen tombent dans les 100 premiers mètres. Les 5 % restant, en revanche, partent dans l'atmosphère et fécondent jusqu'à 3 kilomètres. De plus, il faut prendre en compte les incertitudes de mesure liées à l'échantillonnage. Si le seuil d'étiquetage OGM est de 0,9 % du génome de la plante, les filières non OGM (la quasi-totalité de la production européenne) visent un seuil de 0,1 % pour être sûres de ne pas atteindre le seuil d'étiquetage. Et pour obtenir un tel seuil, ce ne sont plus 50 mètres et 3 rangs de maïs non OGM qu'il faut placer entre les cultures OGM et non OGM, mais des kilomètres.

Co-Extra, un programme de recherche européen que je coordonnais, a étudié cette question entre 2005 et 2009. Il a ainsi démontré que si l'on prend tous ces aspects en compte, la coexistence ne doit pas être négociée avec son voisin, mais entre des zones de cultures dédiées. Au Portugal, par exemple, les agriculteurs d'OGM se sont regroupés autour de coopératives OGM et ont négocié avec ceux des cultures conventionnelles de constituer autour d'eux des zones tampons de plusieurs kilomètres.

PLS

Que va-t-il se passer à présent ?

Y. B. : Le plus grand flou persiste. Par saisine datée du 22 février, mais révélée qu'en avril, le gouvernement a saisi le HCB pour « compléter » le premier rapport provisoire, que je considère donc nul et non avenu, avec quelques points que j'avais soulevés, tels que la traçabilité des plantes obtenues ou leurs risques pour la santé et l'environnement. Le nouveau rapport doit être rendu avant l'été 2016, un délai bien court pour apporter une expertise sur des sujets aussi complexes. Mais je ne me fais pas trop d'illusions, l'enjeu économique pèse trop et les jeux sont faits. La Commission européenne elle-même n'arrive pas à prendre position et a reculé à fin 2016 son avis, qu'elle devait rendre fin 2015, notamment sous la pression américaine, en particulier à cause du TAFTA, le projet de zone de libre-échange entre les États-Unis et l'Europe.

OGM ou non OGM, la vraie question n'est pas là, mais dans le recul que nous voudrons bien nous accorder sur les techniques utilisées. En d'autres termes, quelle agriculture voulons-nous ? Et c'est au citoyen de répondre. Le rôle du HCB est de lui fournir toutes les informations possibles et imaginables, afin qu'il puisse faire son choix en fonction des avantages et inconvénients. Des informations scientifiques neutres, objectives et nuancées. Il a failli à sa tâche et sort décrédibilisé de cette expertise scientifique « Canada Dry ». Sa gouvernance est à reprendre au plus vite. ■

Propos recueillis par Marie-Neige CORDONNIER

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



Les vertus du canular

Les articles canulars dont ont été victimes quelques revues académiques mettent en relief des dysfonctionnements du monde intellectuel et la fatuité de certaines vedettes.

Entre autres anecdotes, Pierre Belfond, célèbre éditeur parisien, raconte dans *Les Pendus de Victor Hugo* (Fayard, 1994) comment il avait refusé de publier un manuscrit de Victor Hugo. Le texte lui était parvenu par la poste et l'on avait changé le nom de l'auteur et le titre du roman. Il s'agissait d'un canular. Et lui, l'amoureux de la littérature, n'avait pas reconnu la plume du maître !

L'auteur dudit canular voulait démontrer le caractère arbitraire de la sélection des manuscrits qui arrivent par la poste. Ce type de canular a été tenté cent fois et a cent fois réussi. La procédure a le mérite de rassurer les innombrables aspirants à l'édition (« On me refuse pour de mauvaises raisons »), mais elle en a un autre, celui de souligner les défauts des processus de sélection. Ici, le dispositif se révélerait trop sélectif puisqu'il aboutirait au refus d'auteurs vénérés.

Mais le canular peut aisément dévoiler le phénomène inverse : des processus sélectifs beaucoup trop lâches. De ce point de vue, l'article « Transgressing the boundaries : towards a transformative hermeneutics of quantum gravity », paru en 1996 dans la revue *Social Text* aux États-Unis, est prototypique. De l'aveu même de son auteur Alan Sokal, il est constellé de sottises. Et pour cause, l'objectif de ce physicien était de montrer qu'une partie des sciences humaines se payent de mots, notamment lorsqu'elles cherchent à importer, sans les comprendre, des concepts des sciences de la nature. L'acceptation de cet article absurde par une revue universitaire en était la preuve.

Les réactions outrées que cet article et le livre subséquent ont suscitées constituent à elles seules des trésors pour les futurs historiens des canulars. Il est vrai qu'on y moquait quelques figures respectées des sciences humaines et sociales, telles que Bruno Latour, l'un des sociologues les plus cités au monde.

LE CANULAR D'ALAN SOKAL, en 1996, a suscité de nombreuses et vives réactions. Un sujet pour les sociologues !

La procédure a été reproduite il y a environ un an et c'est la revue *Sociétés* qui en a fait les frais. L'article, intitulé « Automobilités postmodernes : quand l'Autolib' fait sensation à Paris » et rédigé par deux sociologues (Manuel Quinon et Arnaud Saint-Martin) sous le pseudonyme de Jean-Pierre Tremblay, était totalement loufoque et pastichait certaines fantaisies de la sociologie « postmoderne ». On y trouve des perles telles que : « À travers l'examen de l'esthétique du véhicule (que l'on caractérise comme poly-identificatoire), comme de ses caractéristiques et fonctionnalités les plus saillantes (la voiture électrique connectée illustre le topos contemporain de "l'enracinement dynamique") ». Le but des deux auteurs était, entre autres, de montrer que la revue ne sélectionnait pas sérieusement ses articles. Démonstration faite.

Plus récemment encore, deux philosophes, Anouk Barberousse (CNRS/université Lille 1) et Philippe Huneman (CNRS/université Paris 1), ont réussi à publier un texte totalement absurde dans une revue consacrée au philosophe Alain Badiou et au comité éditorial de laquelle il appartient. Alain Badiou, connu pour être l'un des derniers maoïstes de la scène intellectuelle, et à vrai dire une star des médias plutôt que des universités, s'en est ému. Comme Michel Maffesoli, le directeur de la revue *Sociétés*, il a invoqué la jalousie supposée des auteurs du canular pour réduire à rien la portée de son enseignement.

Je pense que dans ces affaires, dont nous devrions tous rire, les réactions sociales sont au moins aussi intéressantes que le processus en lui-même. Cela nous invite à considérer que les canulars académiques ont au moins deux vertus. D'une part, celle de montrer les défauts de régulation de certains marchés intellectuels, que les pairs devraient considérer comme des symptômes inquiétants, sur lesquels il faut réfléchir. D'autre part, mais c'est plus anecdotique, celle de souligner la fatuité de certains personnages qui occupent le devant de la scène. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek



La résurrection de l'imparfait du subjonctif

Les outils disponibles sur le Web facilitent l'utilisation de mots et de temps tombés en désuétude.

Depuis quelque temps, je m'aperçois que j'utilise plus souvent l'imparfait du subjonctif, sans que je n'aie réussi à quantifier ce phénomène, ni à savoir s'il concernait d'autres personnes que moi.

Pas plus que quiconque, je ne sais cependant si je dois écrire qu'il aurait fallu « que nous résolvions », « que nous résolûmes » ou « que nous résolussions » un problème. Et comme je ne tiens pas à m'exposer à la raillerie, je me suis longtemps contenté d'écrire qu'il aurait fallu « l'avoir résolu », employant ainsi une stratégie d'évitement qui, comme l'avait remarqué le linguiste André Martinet (« Les puristes contre la langue » dans *Le français sans fard*, 1969), appauvrit la langue.

Toutefois, savoir que la forme correcte est « que nous résolussions » n'est pas si difficile. Lorsque nous écrivons en utilisant un logiciel de traitement de texte, sur un ordinateur par ailleurs relié au réseau Internet, il nous suffit de lancer la requête « résoudre conjugaison » dans un moteur de recherche pour tomber sur une page web qui nous donne la conjugaison de ce verbe à tous les temps. Bien entendu, sans utiliser Internet, nous aurions pu trouver cette même information dans un livre de grammaire. Mais, pour cela, il aurait fallu que nous nous levassions de notre chaise, que nous le trouvassions dans la bibliothèque et que nous l'y remissions ensuite, dissipant ainsi une telle quantité d'énergie que, longtemps, nous avons préféré utiliser une autre construction syntaxique.

Si les puristes œuvrent contre la langue, celle-ci a désormais trouvé, avec les sites de conjugaison en ligne, une parade, qui nous permet d'utiliser, sans crainte, les verbes des quelque 80 groupes du français, à chacun de leurs 23 temps. Bien entendu, cette parade concerne uniquement la langue écrite, car il faudra sans doute encore une révolution technique avant que nous puissions consulter une table de conjugaison en ligne tout en bavardant à la terrasse d'un café.

Fallait-il que je vous aimasse,
Que vous me désespérassiez.
Et qu'en vain je m'opiniâtrasse
Et que je vous idolâtrasse,
Pour que vous m'assassinassiez !

Alphonse Allais

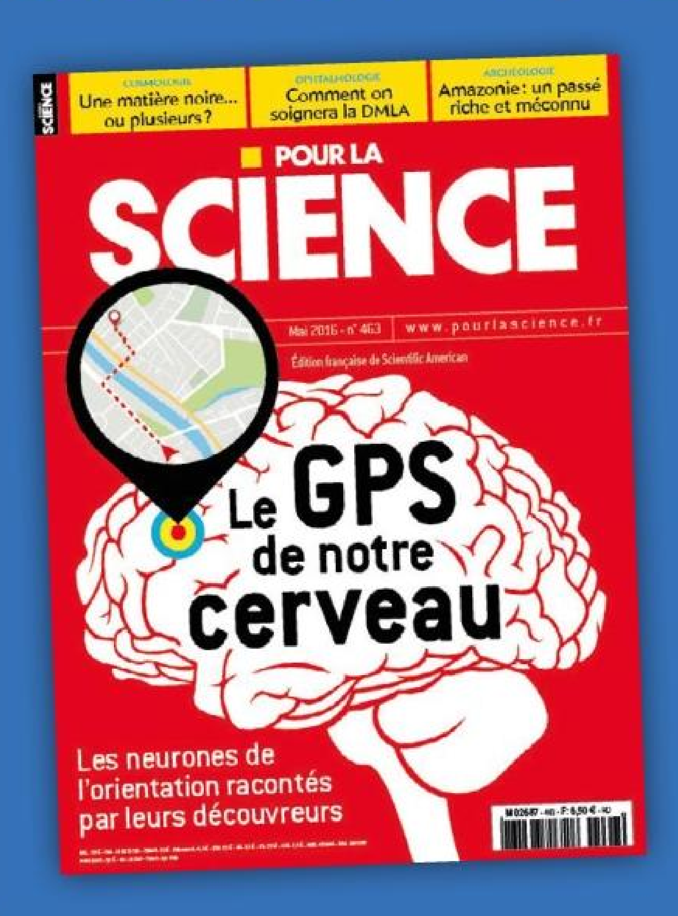
Notre cerveau intracrânien n'est apparemment capable d'utiliser qu'un petit nombre de temps, mais notre cerveau augmenté – par une connexion au réseau – est capable d'en utiliser davantage. Nous pouvons donc nous demander pourquoi nous devrions nous limiter à une vingtaine de temps. Le français, par exemple, a 7 temps pour le présent, 14 pour le passé, mais seulement 2 pour le futur. Si notre cerveau augmenté peut utiliser un nombre quelconque de temps, pourquoi ne pas inventer un futur du subjonctif ou un futur de l'impératif ? Il ne serait pas nécessaire d'apprendre par cœur la conjugaison de tous les verbes à ces nouveaux temps, puisqu'il suffirait de consulter une table de conjugaison.

Notre cerveau, désormais augmenté, pourrait donc utiliser une grammaire plus riche que celle que nous utilisons aujourd'hui. Et ce qui est vrai de la grammaire l'est également du vocabulaire. Longtemps, utiliser dans un texte des mots tels qu'« amphigouri » ou « phébus » l'obscurcissait, car peu de lecteurs en connaissaient la signification et moins encore faisaient l'effort de les chercher dans un dictionnaire. Mais il suffit désormais de lancer la requête « amphigouri définition » ou « phébus définition » dans un moteur de recherche pour en connaître immédiatement la signification. Et l'art de deviner la signification d'un mot en utilisant le contexte de l'une de ses occurrences tombe, peu à peu, en désuétude.

De même que certains anthropologues supposent que nos langues complexes ont émergé il y a 70 000 ans, à la suite d'une transformation de la structure de notre cerveau, il est possible que les langues que nous utilisons aujourd'hui connaissent un nouveau saut de complexité, à la suite de cette nouvelle transformation de structure que constitue la connexion de notre cerveau à une table de conjugaison, à un dictionnaire et à un correcteur orthographique. ■

Gilles DOWEK est chercheur chez Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

OFFRE DÉCOUVERTE | ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N^OS 59€ — 24% d'économie

2 ANS - 24 N^OS 110€ — 29% d'économie

3 ANS - 36 N^OS 159€ — 32% d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT — POUR LA SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

PAS464B

❑ **OUI, je m'abonne à *Pour la Science* en formule Découverte :**

- ❑ **1 an • 12 numéros • 59€** au lieu de ~~78,50€~~ (D1A59E)
- ❑ **2 ans • 24 numéros • 110 €** au lieu de ~~157 €~~ (D2A110E)
- ❑ **3 ans • 36 numéros • 159 €** au lieu de ~~235,50€~~ (D3A159E)

MES COORDONNÉES

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Tél. :
Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

❑ Par chèque à l'ordre de *Pour la Science*

❑ Par carte bancaire

N°

Date d'expiration   Clé

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter *Pour la Science* (à remplir en majuscule). @

Grâce à votre email nous pourrons vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de *Pour la Science* ❑ OUI ❑ NON et de ses partenaires ❑ OUI ❑ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/06/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à *Pour la Science*.



La fraude fiscale : une histoire vieille comme le monde

par Cécile Michel, sur le blog Brèves mésopotamiennes

Les « Panama papers » ont dévoilé une vaste affaire de paradis fiscaux dans laquelle nombre de personnalités de la planète ont créé des sociétés offshore non déclarées et donc non soumises à l'impôt. C'est loin d'être un phénomène nouveau : déjà au XIXe siècle… avant notre ère, les marchands assyriens étaient passés maîtres en matière de fraude et de contrebande afin de faire prospérer leurs capitaux – à leurs risques et périls.

Les archives privées découvertes sur le site de Kültepe, l'ancienne Kaniš, en Anatolie centrale, et datées du début du IIe millénaire avant notre ère permettent de retracer les activités de leurs propriétaires. Il s'agit de marchands originaires de la ville d'Assur (sur le Tigre, en Iraq) venus vendre étain et étoffes de luxe pour rapporter chez eux or et argent.

Ce commerce à longue distance, favorisé par des mesures protectionnistes édictées par les rois d'Assur, était réglementé par des conventions commerciales signées avec les souverains des royaumes traversés par les marchands ou dans lesquels ils s'étaient installés. Selon ces accords, les autorités locales assuraient aux caravanes assyriennes le droit de passage, la protection des routes et garantissaient les pertes causées par des vols commis sur les territoires contrôlés. Les marchands jouissaient d'un droit de résidence et de protection dans les comptoirs de commerce. En contrepartie, ils devaient régler les taxes sur les caravanes aux postes douaniers des territoires traversés et les impôts dus aux palais anatoliens.

Aussi bien les Assyriens que les gouvernements locaux avaient tout intérêt au renouvellement de ces traités : les premiers sacrifiaient une partie de leurs bénéfices pour une sécurité accrue, tandis que les seconds tiraient des revenus directs et indirects du commerce.

En dépit de ces traités commerciaux, les conflits entre les autorités anatoliennes et les marchands assyriens étaient fréquents. Le palais local était mauvais payeur et tardait à régler l'étain et les étoffes qu'il achetait aux Assyriens. Quant aux marchands, pour augmenter leurs bénéfices grevés par les taxes, ils s'essayaient à la contrebande.


Cécile Michel © Mission archéologique de Kültepe

Lettre d'un marchand assyrien emprisonné dans un palais anatolien.

Pour éviter les postes douaniers, ils empruntaient des chemins détournés et non surveillés… au risque de croiser des bandes de brigands qui les dépouillaient ! Pour échapper aux droits d'entrée, ils n'enregistraient qu'une partie des marchandises importées, le surplus pouvant être transporté de façon clandestine : « Si le chemin détourné est sûr, c'est par (ce) chemin détourné que mon étain et mes étoffes, autant qu'il en aura fait passer, devront me parvenir par une caravane », écrit un marchand. « Si le chemin détourné est impraticable, que l'on apporte l'étain à Hurrama. Que des habitants de Hurrama fassent entrer la totalité de l'étain (dans la ville) par quantités de un talent (30 kilogrammes) chacun ; ou encore, que l'on fasse des paquets de 10 ou 15 mines (5 ou 7,5 kilogrammes) chacun, et que les employés (de la caravane les) fassent entrer (dans la ville cachés) dans leurs sous-vêtements. Une fois que l'on aura fait entrer le premier talent sans incident, alors seulement que l'on fasse entrer de nouveau un talent… » Les marchands n'hésitaient donc pas à laisser une trace écrite des méthodes qu'ils utilisaient pour contourner les postes douaniers.

La contrebande réussissait à certains marchands, qui réalisaient d'importants bénéfices. Mais ils attisaient aussi la jalousie de leurs voisins et risquaient une dénonciation. Face à une telle imagination déployée pour la fraude, les autorités prenaient des mesures à l'encontre des marchands assyriens : mises en garde, perquisitions, amendes, assignations à résidence, voire emprisonnements pour fraude fiscale. Quelles mesures seront prises à l'encontre des fraudeurs révélés par les « Panama papers » ?


Cécile MICHEL est assyriologue et directrice de recherche du CNRS au laboratoire Archéologies et sciences de l'Antiquité, à Nanterre. Elle préside l'International Association for Assyriology et tient le blog Brèves mésopotamiennes (www.scilogs.fr/breves-mesopotamiennes).

Comment LA PHYSIQUE protégera notre vie

QUANTIQUE privée

Artur Ekert et Renato Renner

Les méthodes de chiffrement actuelles ne sont pas aussi fiables qu'on le pense. Comment alors protéger nos données et nos communications ? Des recherches récentes montrent que la cryptographie quantique offre des solutions robustes.

L'écrivain américain et cryptographe amateur Edgar Allan Poe constatait dans sa nouvelle *Le Scarabée d'or* (1843) : « On peut affirmer sans ambages que l'ingéniosité humaine ne saurait concocter un code secret que l'ingéniosité humaine ne puisse résoudre. » Dès lors, sommes-nous condamnés à devoir renoncer à la confidentialité de nos communications, quels que soient nos efforts pour protéger notre vie privée ? Si l'histoire des communications secrètes peut servir de guide en la matière, la réponse est un « oui » retentissant. Les exemples ne manquent pas pour illustrer comment les efforts des meilleurs codeurs ont toujours été rattrapés par l'ingéniosité des décrypteurs. Il pourrait en aller autrement avec la cryptographie quantique, imaginée il y a près de trente ans. Les progrès les plus récents dans ce domaine confirment qu'il

Kenn Brown/Mondolithic Studio

est possible de concevoir des systèmes de chiffrement capables de protéger la vie privée de façon fiable.

Dans le domaine du chiffrement, être paranoïaque est un atout. S'interroger de façon systématique sur les qualités et les défauts d'un système qui chiffre des données permet de se prémunir des mauvaises surprises. Ainsi, il est naturel de se poser les questions suivantes : nos secrets sont-ils à l'abri d'adversaires qui détiennent une capacité technologique supérieure ? Peut-on faire confiance à ceux qui nous fournissent les systèmes de chiffrement ou même peut-on avoir confiance en nous-même, en notre libre arbitre ? Les systèmes de chiffrement modernes n'y répondent pas toujours à la hauteur de nos espérances. Cependant, la physique quantique va nous offrir des solutions efficaces.

La menace de l'ordinateur quantique

L'alliée de demain en matière de chiffrement est ainsi la physique quantique. De façon étonnante, elle est aussi le domaine de recherche dont les progrès mettent en péril les systèmes de chiffrement utilisés quotidiennement dans notre monde hyperconnecté. En effet, nos courriels ou nos données bancaires, bien que chiffrés, ne sont pas à l'abri d'avancées techniques dont profiteraient les indiscrets. L'une des plus grandes menaces aujourd'hui est la possibilité de construire un ordinateur quantique. Un tel dispositif, dont les capacités de calcul reposent sur les principes de la physique quantique, décrypterait rapidement les messages chiffrés par les meilleurs systèmes utilisés aujourd'hui.

Par exemple, une méthode de chiffrement très répandue est le système RSA, proposé en 1977. Son principe repose sur deux clés, l'une publique et l'autre privée *(voir l'encadré page ci-contre)*. Une personne désirant vous envoyer un message chiffré utilisera votre clé publique, connue de tous. Mais seule la clé privée, que vous êtes le seul à connaître, permet d'inverser la procédure pour récupérer le message en clair. Les deux clés ne sont pas arbitraires : la clé publique est un très grand nombre, égal au produit de deux nombres premiers qui constituent la clé privée. Ainsi, une façon d'attaquer le système pour décrypter le message consiste à déterminer les nombres premiers dont est composée la clé publique. Or la factorisation d'un grand nombre est un problème dit difficile, car il requiert beaucoup de calculs qui dépassent les capacités des ordinateurs actuels. Avec le système RSA, vos données sont *a priori* bien protégées.

Cependant, en 1994, le mathématicien Peter Shor, alors aux laboratoires d'AT&T-Bell, a montré qu'un ordinateur quantique pourrait factoriser de grands nombres assez rapidement. L'algorithme de Shor rendrait ainsi le système RSA obsolète – à condition que l'on parvienne à fabriquer un ordinateur quantique ! Ce ne sera probablement pas le cas avant plusieurs décennies, mais qui peut prouver, ou donner des garanties fiables, que cet horizon est si lointain ? Ainsi, c'est sur la confiance en la lenteur du progrès technologique que repose la sécurité des meilleures méthodes actuelles de chiffrement.

Il est donc raisonnable de chercher d'autres façons de chiffrer nos données. Pour y parvenir, il est important de bien comprendre les exigences d'une communication parfaitement sécurisée. En substance, tout ce dont nous avons besoin pour construire un chiffrement parfait est de partager une séquence de bits aléatoires, la « clé de chiffrement ». Deux utilisateurs (traditionnellement nommés Alice et Bob) partagent la clé, qu'ils utilisent pour communiquer secrètement grâce à une procédure de chiffrement. Une méthode simple et supposée inviolable est le masque jetable, ou chiffre de Vernam. La clé est une suite de caractères au moins aussi longue que le message à chiffrer. Chaque lettre du message est combinée à un caractère de la clé, dont on additionne les valeurs (A = 1, B = 2, etc.) pour donner une nouvelle lettre.

On suppose robuste la méthode tant que le masque est une suite aléatoire de caractères et que chaque masque n'est utilisé qu'une fois. Même si elle connaît la méthode générale de chiffrement, une tierce personne – Ève – qui intercepte le message chiffré ne sera pas en mesure d'en tirer des informations utiles sans la clé. Mais cette méthode pose un problème insoluble, celui de la distribution de la clé : comment Alice et Bob peuvent-ils se transmettre cette dernière en toute sécurité ? Les méthodes de cryptographie asymétrique à deux clés, telles que RSA, contournent la difficulté. Cependant, comme nous l'avons vu, elles pourraient un jour devenir vulnérables.

La cryptographie quantique offre une solution alternative au problème de la distribution des clés. En s'appuyant sur

L'ESSENTIEL

- **La réalisation d'un ordinateur quantique rendrait caduques les méthodes de cryptage actuelles.**
- **Des méthodes de chiffrement fondées sur des propriétés quantiques, dont l'idée a été émise il y a plus de vingt ans, pourraient contrer cette menace.**
- **Des chercheurs ont montré que, moyennant certaines conditions, la cryptographie quantique peut assurer une confidentialité parfaite.**
- **Plusieurs dispositifs de cryptage quantique sont déjà en service dans le monde.**

des propriétés des systèmes quantiques, Alice et Bob pourraient échanger certaines informations leur permettant de construire une clé commune. Ils seraient aussi en mesure de savoir si ces informations ont été interceptées et, le cas échéant, de décider de définir une nouvelle clé.

Une solution idéale contre l'espionnage

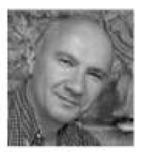
La distribution quantique des clés a d'abord été proposée en 1984 par Charles Bennett, chercheur chez IBM, et Gilles Brassard, alors à l'université Cornell. La sécurité de la transmission de la clé y est garantie par le principe d'incertitude de Heisenberg, selon lequel certaines paires de propriétés physiques, telles la position et la quantité de mouvement d'une particule, sont complémentaires et ne peuvent être connues avec précision simultanément. Cette idée a été appliquée à la polarisation de photons *(voir l'encadré pages 30 et 31)*. Puis, en 1991, l'un de nous (Artur Ekert) a proposé un dispositif de distribution quantique des clés reposant sur la « monogamie de l'intrication quantique », propriété de certaines corrélations quantiques qui ne peuvent être partagées avec plus d'une personne. Nous y reviendrons.

L'idée d'utiliser des phénomènes quantiques pour améliorer le secret des communications n'était au début qu'une simple curiosité académique, mais, avec les progrès des technologies, elle a été reprise par les physiciens expérimentateurs et finalement développée en une proposition commerciale viable *(voir l'encadré page 33)*.

En théorie, la cryptographie quantique offre le système de chiffrement le plus sécurisé. En pratique, cependant, tout système peut présenter des failles de conception, qui exposent les données chiffrées à des attaques. De telles failles peuvent être involontaires, résultant de l'ignorance ou de la négligence d'individus honnêtes qui conçoivent les systèmes de chiffrement quantique ; mais elles peuvent aussi être malveillantes, implantées subrepticement par des adversaires puissants.

Étant donné que certains des défauts peuvent nous être inconnus, comment avoir la certitude que personne n'intercepte nos communications ? Ce maillon faible semblait incontournable et nous avons longtemps

LES AUTEURS




Artur EKERT est professeur de physique quantique à l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, et directeur du Centre des technologies quantiques de l'université de Singapour.

Renato RENNER est directeur de recherche à l'Institut de physique théorique de l'École polytechnique de Zurich, en Suisse.

Article publié avec l'aimable autorisation de *Nature*.

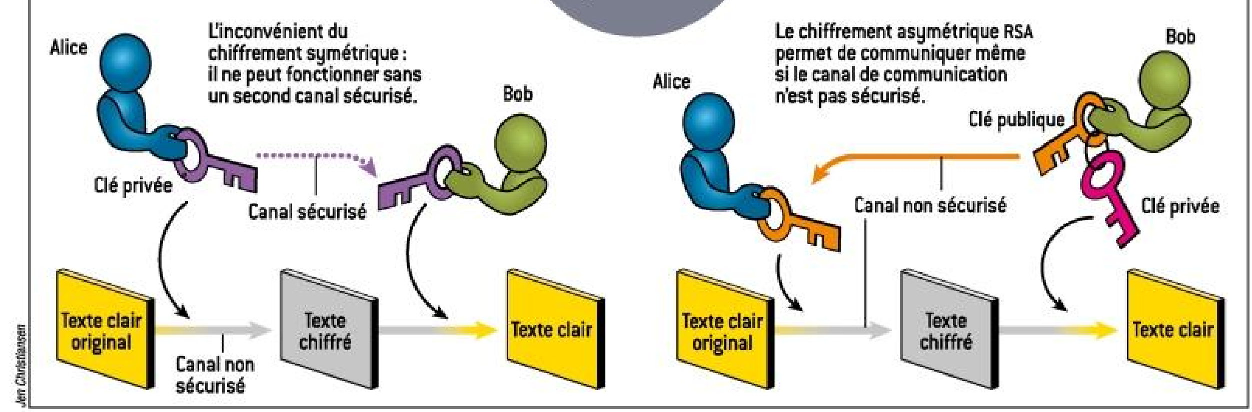
CHIFFRER DES DONNÉES AUJOURD'HUI

À chaque fois que vous faites un achat sur Internet, votre navigateur et le site du vendeur doivent échanger une clé pour chiffrer les informations qui seront transmises. Avec le chiffrement symétrique, les interlocuteurs utilisent la même clé. Dans le cas du chiffrement asymétrique, tel RSA, une clé publique sert à chiffrer les messages, une autre est gardée secrète pour les déchiffrer.

CHIFFREMENT SYMÉTRIQUE
Alice chiffre son message avec une clé et le transmet à Bob. Si quelqu'un intercepte le message, celui-ci sera illisible. Pour retrouver le message en clair, Bob utilise la même clé, envoyée par Alice sur un canal caché et sécurisé.

Le chiffrement asymétrique RSA est fiable dans la mesure où les ordinateurs classiques ne peuvent factoriser de grands nombres.

CHIFFREMENT ASYMÉTRIQUE RSA
Bob, le destinataire du message, définit deux clés : une clé publique – un très grand nombre –, qu'Alice utilise pour chiffrer son message, et une clé privée – deux nombres premiers dont le produit est égal à la clé publique – que Bob utilise pour déchiffrer.



Jen Christiansen

cru que les limites de la confidentialité étaient là : aussi efficace que soit le système de chiffrement utilisé, tout espion technologiquement plus avancé aura le dessus – que ce soit la NSA ou le FBI, par exemple. Or il s'est avéré que la cryptographie quantique n'est pas exposée aux failles possibles du système. Elle peut en effet garantir la confidentialité avec un minimum d'ingrédients : d'une part, des corrélations monogames, à savoir des liens entre grandeurs physiques que seuls Alice et Bob peuvent mesurer ; d'autre part, une petite dose de « libre arbitre », défini ici comme la capacité de faire des choix indépendants de tout ce qui est préexistant, donc des choix imprévisibles.

Ces conditions suffisent pour créer et distribuer des clés sûres. Plus étonnant, elles assurent que, même si nous utilisons des dispositifs de provenance inconnue ou douteuse, voire fabriqués par nos ennemis, la sécurité des données est assurée.

Évidemment, quelques précautions sont de mise : les dispositifs de chiffrement doivent être placés dans des lieux bien isolés pour empêcher toute fuite des données enregistrées servant à construire la clé de chiffrement, et seules des personnes de confiance doivent y avoir accès. Dans ces conditions, on montre qu'un test statistique suffit pour valider la sécurité du système, même sans aucune connaissance de son fonctionnement interne. On parle de cryptographie « indépendante du dispositif ». Ces dernières années, des progrès rapides ont permis de confirmer la fiabilité de ce type de cryptographie, qui constitue l'un des domaines de recherche les plus actifs en sciences de l'information quantique.

Communiquer avec des pièces magiques

Nous avons présenté les concepts essentiels de la cryptographie quantique. Cependant, il reste à clarifier les notions de corrélation monogame et de libre arbitre et à voir comment les mettre en œuvre. Comme nous l'avons souligné, le problème crucial est celui de la distribution de la clé de chiffrement : pour que leur communication reste confidentielle, Alice et Bob doivent trouver un moyen de générer et se partager les bits de la clé. Comment faire ? Dans un premier temps, imaginons un système fictif qui illustre les notions cruciales de corrélations monogames et de libre arbitre.

Supposons que l'on dispose de deux pièces de monnaie liées de façon magique, de telle sorte qu'elles présentent toujours le même côté lorsqu'on les tire à pile ou face (et en supposant que le côté pile a la même probabilité d'apparaître que le côté face). Alice et Bob, chacun muni d'une pièce, peuvent alors lancer ces pièces en notant « 0 » pour face et « 1 » pour pile. Après plusieurs lancers, la chaîne binaire obtenue, la clé, est aléatoire et connue simultanément d'Alice et de Bob.

Cette clé est-elle secrète ? Pas nécessairement. Ève, munie de capacités technologiques supérieures, pourrait fabriquer une pièce supplémentaire, magiquement liée à celles détenues par Alice et Bob. Les trois pièces concordant toujours, Ève connaîtrait aussi les bits obtenus par Alice et Bob.

À l'évidence, pour que le secret soit garanti, Alice et Bob doivent pouvoir faire quelque chose qui échappe au contrôle d'Ève. Par exemple, Alice et Bob peuvent avoir le choix entre deux pièces différentes (A_1 ou A_2 pour Alice, B_1 ou B_2 pour Bob). Pour chaque lancer, chacun n'utilise qu'une pièce et il est interdit de lancer ses deux pièces en même temps. On suppose les liens magiques tels que les pièces d'Alice et de Bob donnent toujours un résultat identique, sauf quand ils lancent A_1 et B_2, qui donnent toujours

CHIFFRER SES DONNÉES GRÂCE À LA PHYSIQUE QUANTIQUE

En cryptographie quantique, la distribution d'une clé se fait grâce à un flux de photons polarisés (présentant une direction de spin particulière). Si une tierce personne tente de mesurer la polarisation de ces photons en chemin, le seul acte de la mesure modifie la polarisation de certains photons. L'émetteur et le destinataire du message pourront alors savoir que quelqu'un a tenté de lire l'échange. Le dispositif présenté ici est celui imaginé en 1984 par Charles Bennett et Gilles Brassard.

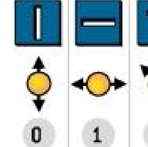
L'émetteur possède quatre filtres polarisants parmi lesquels il choisit selon la valeur du bit qu'il veut transmettre.

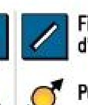
Photon

Photon polarisé

ENVOI ET RÉCEPTION DE PHOTONS POLARISÉS

L'émetteur *(en bleu)* transmet une série de photons qui passent par l'un des quatre filtres polarisants. Chaque filtre polarise le photon selon une direction, à laquelle on assigne une valeur de bit 0 ou 1 *(voir ci-dessous)*. Le destinataire *(en vert)* mesure la polarisation après le passage du photon par l'un de ses deux filtres.






Filtres d'émission	|	—	\\	/
Polarisation				
Valeur des bits attribuée	0	1	0	1

Jen Christiansen

un résultat opposé. Cette magie peut être résumée par les quatre conditions suivantes:

$A_1 = B_1$ $B_1 = A_2$

$A_2 = B_2$ $B_2 \neq A_1$

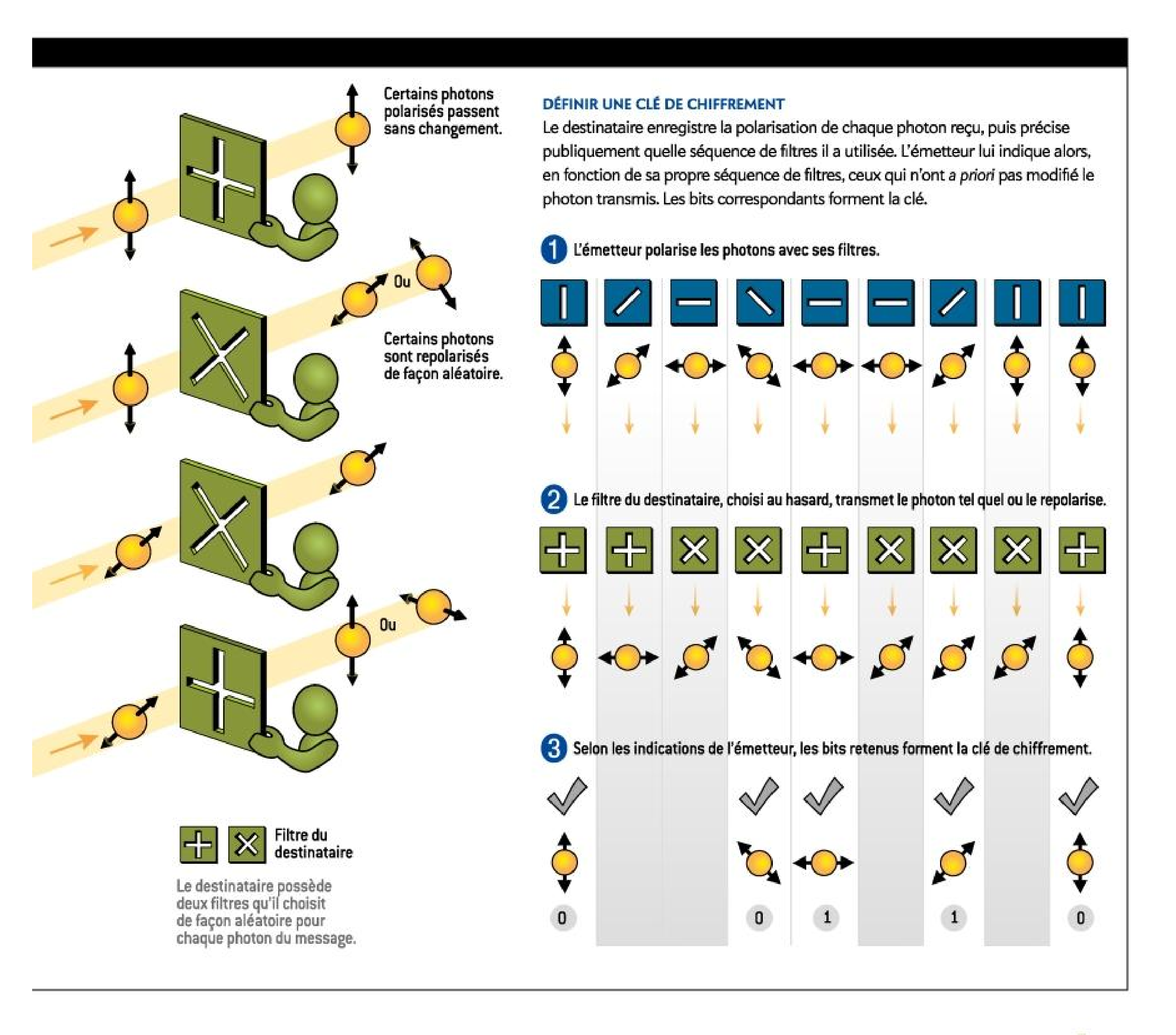
Ces conditions sont clairement contradictoires: il est impossible d'assigner à A_1, A_2, B_1 et B_2 des valeurs telles que les quatre conditions soient simultanément satisfaites. Mais il faut se rappeler qu'Alice et Bob ne peuvent lancer qu'une pièce chacun, et qu'ils ne peuvent donc tester qu'une seule des quatre conditions à la fois; cela ne conduit à aucune contradiction.

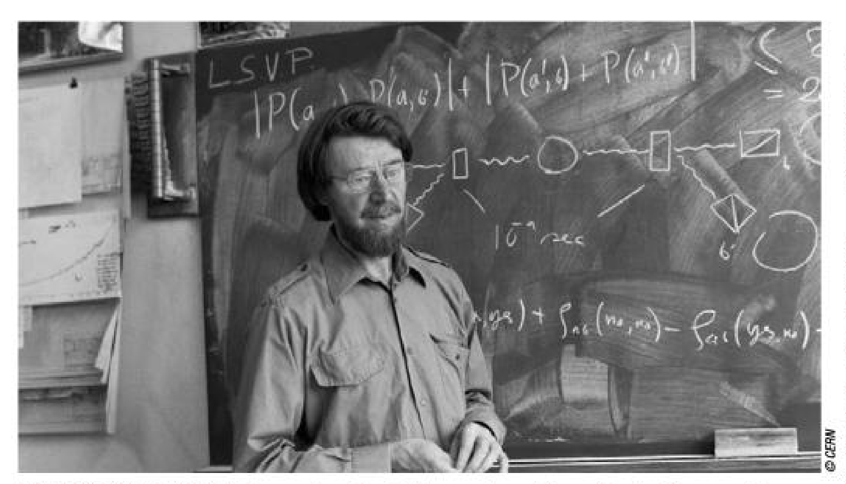
Mais si, par exemple, Alice enfreint la règle et lance ses deux pièces A_1 et A_2 en même temps, que se passe-t-il? Supposons qu'Alice obtienne deux faces ou deux piles ($A_1 = A_2$); alors Bob n'a pas d'autre choix que de lancer B_1, parce que c'est le seul lancer compatible avec les conditions des pièces magiques. De la même façon, si Alice obtient une pièce face et une pièce pile ($A_1 \neq A_2$), le seul choix qui reste à Bob est de lancer B_2.

Ainsi, lorsque Alice lance ses deux pièces, elle prive Bob de sa liberté de choisir la pièce qu'il veut tirer. Cette situation bizarre implique qu'Alice ne peut pas lancer ses deux pièces en même temps, sous peine de contradictions. Cela implique aussi que les pièces magiques ne peuvent pas être clonées. Si Ève avait une pièce Z constituant un clone de A_1, lorsque Alice lance A_2, on retrouverait des contradictions comme précédemment.

En conclusion, si les choix d'Alice et de Bob sont libres, les corrélations doivent être monogames, c'est-à-dire qu'aucune pièce tierce ne peut être corrélée à A_1, A_2, B_1 ou B_2. Cela redonne à Alice et Bob l'avantage sur Ève: ni elle, ni personne d'autre ne peut fabriquer une pièce qui correspondra toujours avec l'une quelconque des pièces détenues par Alice et Bob.

Tous les ingrédients de la distribution sécurisée des clés sont désormais en place. Concrètement, pour créer une clé de chiffrement, Alice et Bob lancent leurs pièces magiques. À chaque lancer, Alice et Bob





LE PHYSICIEN JOHN BELL pose devant un tableau sur lequel figure *(en haut)* une certaine formulation des inégalités qui portent son nom, en 1982. Le schéma décrit le principe d'une expérience qui permet de vérifier expérimentalement si les inégalités de Bell sont violées, conformément aux prévisions de la théorie quantique. Une telle expérience a été menée en France par l'équipe d'Alain Aspect la même année.

© CERN

choisissent au hasard et indépendamment l'un de l'autre la pièce concernée. Après le lancer, ils annoncent publiquement la pièce que chacun a choisie, mais pas le résultat obtenu. Comme les pièces vérifient les conditions énoncées précédemment, Alice et Bob savent ce que l'autre a obtenu : un résultat identique, sauf quand A_1 et B_2 ont été lancés, auquel cas les deux résultats sont opposés. Ève n'a aucun moyen de connaître le résultat puisqu'elle ne peut pas cloner les pièces. Pour établir une clé plus longue, Alice et Bob répètent simplement la procédure autant de fois que nécessaire.

Remarquons qu'Alice et Bob n'ont pas besoin de faire des hypothèses sur la provenance des pièces. Tant que les pièces vérifient les quatre conditions des pièces magiques, la sécurité du chiffrement est garantie. Pour s'assurer que les pièces vérifient effectivement ces conditions et n'ont pas été truquées ou clonées par un ennemi, Alice et Bob se communiquent les résultats d'un certain nombre de tirages choisis au hasard et vérifient s'ils sont en accord avec les conditions des pièces magiques. Ces résultats dévoilés publiquement sont ensuite éliminés, et la clé est composée des résultats des lancers restants, qui n'ont jamais été révélés publiquement. Si Alice et Bob remarquent un désaccord dans les tirages comparés, cela signifie que quelqu'un a essayé d'intercepter la clé. Alice et Bob jettent l'ensemble des bits de la clé et font un nouvel essai avec un autre jeu de pièces.

Bien sûr, Alice et Bob doivent s'assurer que le résultat des lancers non révélés, qui sert à construire la clé, est sous bonne garde. Il faut aussi supposer qu'Alice et Bob communiquent publiquement sans que personne ne modifie leurs messages ou n'usurpe leur identité. Dès lors, le secret de la clé est uniquement fondé sur la monogamie des corrélations magiques et sur une hypothèse anodine mais essentielle : Alice comme Bob peuvent choisir librement la pièce à lancer.

Des photons polarisés et intriqués

Il semble que nous ayons atteint notre objectif : Alice et Bob sont capables de générer et communiquer une clé de façon sécurisée. Il n'y a qu'un petit ennui avec notre solution au problème de distribution des clés : les corrélations magiques n'existent pas. En d'autres termes, nous ne connaissons aucun processus physique qui puisse les reproduire. Mais tout n'est pas perdu, car il existe des corrélations physiques suffisamment « magiques » pour nos besoins : bienvenue dans le monde quantique !

La théorie quantique gouverne tous les objets, grands et petits, mais ses conséquences sont plus marquées dans les systèmes microscopiques tels que les atomes individuels et les photons. Pour concevoir des systèmes quantiques de chiffrement, nous faisons appel à des photons polarisés, c'est-à-dire de polarisation bien définie. La polarisation d'un photon correspond à la direction de son spin (son moment cinétique intrinsèque).

Quand on mesure la polarisation selon une direction, seuls deux résultats sont possibles, indiquant si la polarisation du photon juste après la mesure est parallèle ou orthogonale à la direction de mesure. Nous noterons 1 et 0 ces résultats.

Pour le système de chiffrement d'Alice et Bob, les photons polarisés doivent être, en plus, « intriqués ». Deux objets quantiques (ici deux photons) sont intriqués lorsque les états qui les décrivent sont indissolublement liés. La mesure de la polarisation d'un des deux photons intriqués fixe son état de polarisation et, simultanément et instantanément, fixe celui de l'autre photon, même si ce dernier est très éloigné. Cette intrication a ainsi un caractère non local : les états des deux photons sont corrélés même si aucun signal n'a eu le temps d'être échangé entre les deux particules.

Albert Einstein, très attaché au principe de localité, était un farouche critique de l'intrication quantique. En 1935, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il a formulé ses objections sous la forme d'un paradoxe (connu sous le nom de paradoxe EPR). Pour ces trois physiciens, l'intrication quantique impliquait soit que les deux particules ont échangé des informations qui se propagent plus vite que la lumière (ce qui violerait la théorie de la relativité restreinte), soit que la physique quantique est incomplète et que des « variables cachées », inconnues des physiciens, donnent l'illusion de l'intrication quantique.

Le physicien danois Niels Bohr, en revanche, a souligné qu'il n'y a pas de contradiction si l'intrication quantique est un phénomène non local, indépendant de la position des particules. En 1964, le physicien nord-irlandais John Bell a formalisé la question du paradoxe EPR sous la forme d'inégalités qui portent son nom, et qui sont violées si l'intrication est non locale.

Les inégalités de Bell jouent un rôle crucial dans le système de chiffrement quantique. Voyons comment. On remplace les pièces magiques d'Alice et de Bob par des paires de photons intriqués (les physiciens disposent de diverses techniques pour produire des paires de photons intriqués en polarisation). Une source émet ces paires, dont un photon est envoyé à Alice et l'autre à Bob. Au lieu de lancer des pièces magiques, Alice et Bob mesurent la polarisation des photons selon des directions particulières, définies par des angles notés α_1 et α_2 pour Alice et β_1 et β_2 pour Bob. Pour chaque

paire de photons intriqués, Alice et Bob choisissent chacun une direction de mesure de la polarisation. Les photons étant intriqués, ils répondent de façon coordonnée aux mesures effectuées séparément.

L'intrication quantique joue le rôle de la connexion magique entre les pièces, mais la situation physique des photons n'est pas aussi simple que celle des pièces magiques. Par exemple, si Alice utilise la pièce A_1 et Bob la pièce B_1, ils obtiendront à coup sûr le même résultat. Avec les photons, la probabilité qu'Alice et Bob trouvent le même résultat est égale à $\cos^2(\alpha - \beta)$. On définit une grandeur, notée ε, qui quantifie la déviation par rapport aux corrélations des pièces magiques ($\varepsilon=0$ correspond au cas des pièces magiques). On montre alors que pour tout choix d'angles, il est impossible d'annuler ε. La valeur physique la plus petite admissible pour ε est 0,146. On l'obtient avec les angles $\alpha_1=0$, $\alpha_2=2\pi/8$, $\beta_1=\pi/8$ et $\beta_2=3\pi/8$.

Il est ainsi impossible de fabriquer des pièces magiques à partir des photons polarisés et intriqués. Or la connexion magique des pièces garantissait qu'Ève ne puisse pas espionner la discussion entre Alice et Bob. La question qui se pose est donc de savoir si une valeur non nulle de ε permet d'avoir un système de chiffrement fiable. La réponse est oui : il est possible de montrer que l'on obtient un système opérationnel avec des valeurs basses de ε.

Les inégalités de Bell à l'épreuve

Lorsque $\varepsilon \geqslant 1/4$, les corrélations sont dites classiques ; dans cette situation, on peut supposer, sans que l'on se heurte à des contradictions, que les polarisations selon les angles α_1, α_2, β_1 et β_2 ont une valeur bien définie avant la mesure. Ce n'est plus le cas quand $\varepsilon < 1/4$; dans cette situation, supposer que les polarisations ont des valeurs préalables à la mesure conduit à la violation de l'une au moins des quatre conditions des pièces magiques.

Le fait de ne pas pouvoir affecter une valeur numérique à une grandeur physique avant de la mesurer est une bizarrerie inhérente à la physique quantique. Après tout, nous expérimentons au quotidien une réalité *a priori* objective dans laquelle les objets ont des propriétés physiques qui peuvent être quantifiées et dont les valeurs existent indépendamment du fait que nous les mesurions ou non. Et pourtant, même si c'est perturbant, notre monde n'est pas ainsi fait. Des inégalités statistiques, telles que $\varepsilon \geqslant 1/4$, dérivées de l'hypothèse selon laquelle les valeurs des quantités physiques non mesurées existent effectivement et que l'on appelle communément les inégalités de Bell, ont été violées dans un certain nombre d'expériences minutieuses, comme celle qu'Alain Aspect, de l'Institut d'optique à Orsay, et ses collègues ont menée en 1982.

L'une des conséquences de la violation des inégalités de Bell est que la probabilité qu'Ève devine correctement un résultat particulier ne peut dépasser $(1+4\varepsilon)/2$. Si ε est suffisamment petit, Alice et Bob sont en mesure de construire une clé presque parfaite à partir des résultats, en utilisant

Les systèmes de chiffrement quantique sont déjà là

Le principe de chiffrement quantique proposé par Charles Bennett et Gilles Brassard en 1984 est plus simple à mettre en pratique que celui conçu par Artur Ekert en 1991. Les premiers dispositifs sont déjà testés et fonctionnent depuis une dizaine d'années.

La cryptographie quantique a vraiment commencé à sortir des laboratoires au début des années 2000, lorsque les physiciens ont trouvé une solution au refroidissement des dispositifs afin de limiter la perte de photons. Ils ont remplacé l'azote liquide, peu pratique pour un usage à grande échelle, par des systèmes électriques.

Les dispositifs de chiffrement ne prennent pas forcément un grand volume, et peuvent être contenus dans l'équivalent d'une mallette. Une petite diode laser envoie de la lumière sur un filtre si opaque qu'il ne laisse passer, en moyenne, qu'un photon à la fois. Ce photon est polarisé selon une certaine direction pour porter la valeur 0 ou 1 d'un bit. Le photon est ensuite envoyé dans une fibre optique reliée au dispositif du destinataire, qui mesure à son tour la polarisation du photon.

Dans la procédure de Bennett et Brassard, l'expéditeur et le destinataire se concertent pour déterminer les bits qui formeront la clé de chiffrement de leur message. Un espion ne peut deviner la valeur de ces bits, et s'il interceptait les photons lors de leur transmission dans la fibre, cela perturberait leur polarisation. En comparant les mesures sur un échantillon de photons, l'expéditeur et le destinataire détectent aisément si un tiers a tenté d'« écouter » leur échange.

De tels dispositifs sont déjà mis en place. La société Battelle Memorial Institute, aux États-Unis, a par exemple installé un réseau entre deux de ses sites pour échanger des rapports financiers ou d'autres informations confidentielles. La distance parcourue par la fibre optique est limitée à quelques dizaines de kilomètres. Au-dessus d'une centaine de kilomètres, le signal est fortement détérioré du fait de l'absorption des photons par la fibre.

Les chercheurs de Battelle travaillent avec la firme suisse ID Quantique pour mettre au point des réseaux plus étendus à l'aide de boîtes relais. Celles-ci, refroidies à –40 °C, capteraient les photons polarisés et les réémettraient à l'identique. Ces boîtes relais devraient cependant être parfaitement scellées et sécurisées pour empêcher toute intrusion malveillante. Par sécurité, la détection d'une tentative d'intrusion conduirait alors le système à s'éteindre aussitôt.

En attendant que cette idée aboutisse, des projets pour relier la réserve fédérale américaine à ses banques régionales sont à l'étude. Et le gouvernement chinois voudrait installer un dispositif similaire pour son usage et celui des institutions financières entre Shanghai et Beijing, distantes de 2000 kilomètres.

La mise en place à grande échelle de ces systèmes de cryptographie avec fibres optiques est confrontée à un autre obstacle. Les connexions s'accommodent mal d'un réseau ramifié. On retrouve là les difficultés des débuts du téléphone au XIX[e] siècle et ses énormes quantités de câbles pour établir des contacts point à point.

Mais déjà de nouveaux systèmes sont imaginés, toujours plus petits et portatifs. Le secteur pourrait croître très vite dans les années à venir.

– Sean Bailly
Pour la Science

une technique dite d'amplification de la confidentialité. L'idée est assez simple: imaginez que vous ayez deux bits et que votre adversaire en connaisse au plus un (sans que vous sachiez lequel). Additionnez les deux bits modulo 2: le bit résultant sera inconnu de votre adversaire. Avec davantage de bits, il existe des moyens bien plus élaborés pour amplifier la confidentialité.

Pour résumer, à chaque fois que l'on donne à Alice et Bob des dispositifs qui produisent des résultats corrélés, ils peuvent faire tourner le protocole de distribution des clés, complété par un «test d'honnêteté» statistique afin d'estimer ε. Si cette valeur est suffisamment petite, disons ε=0,15, le résultat final, après amplification de la confidentialité, est une clé de chiffrement parfaite. Nous obtenons ainsi une confidentialité fiable à partir de dispositifs non fiables.

Les corrélations monogames assorties à une quantité même faible de libre arbitre suffisent pour protéger notre vie privée

Certains points sont à vérifier avant que l'on soit sûr que notre système n'a pas de faille. En particulier, Alice et Bob peuvent-ils se faire confiance? Il est difficile d'être plus paranoïaque que cela. Sont-ils libres de leurs choix, ou bien sont-ils contrôlés par une force qui leur échappe?

Nous avons déjà souligné l'importance du libre arbitre dans le processus. Le choix de la pièce à lancer ou de la direction de polarisation à mesurer doit être fait librement (aléatoirement) et indépendamment. En général, dans les réalisations pratiques, des générateurs de nombres (pseudo)aléatoires se chargent de tels choix. Mais le hasard qu'ils simulent est-il de qualité satisfaisante?

Il est évident que si tout est prédéterminé, si tous nos choix sont prévisibles ou préprogrammés par nos adversaires, il n'y a pas de confidentialité qui tienne.

Doper le libre arbitre

En réalité, il suffit que la prédétermination ne soit pas complète et qu'il reste un petit peu de liberté. Si une fraction des choix faits par nos générateurs de nombres aléatoires ne peut être déterminée par l'adversaire, alors la confidentialité est encore possible, parce que le caractère aléatoire local peut être amplifié. L'amplification du hasard est obtenue avec des protocoles indépendants du dispositif, et fonctionne même si la fraction de hasard initial est arbitrairement petite.

Tout cela semble bizarre et trop beau pour être vrai. Nous avons montré qu'il est, en théorie, possible d'amplifier le libre arbitre et la confidentialité pour obtenir une méthode de chiffrement totalement fiable. C'est cependant assez difficile à mettre en pratique.

Comme nous l'avons vu, l'un de nous (Artur Ekert) a proposé en 1991 un système de distribution quantique des clés fondé sur la violation des inégalités de Bell. L'année suivante, une démonstration de principe a été réalisée à la Defence Evaluation and Research Agency (aujourd'hui QinetiQ) à Malvern, au Royaume-Uni. Cependant, le caractère «indépendant du dispositif» (c'est-à-dire sans connaître parfaitement l'origine du dispositif) de ce protocole n'a été démontré qu'en 2007. Prouver la sécurité d'un tel système en conditions réelles n'a pas été facile. Il a fallu plus d'une décennie pour s'accorder sur une définition utile du secret, ne serait-ce que pour des dispositifs fiables, et pour réaliser une longue série de tests prenant en compte toutes les ressources quantiques qu'Ève peut mettre à son service. Un défi majeur consiste à rendre ces arguments de sécurité quantitatifs et robustes vis-à-vis du bruit et des imperfections du système.

Pour finir, il convient de souligner que les protocoles indépendants des dispositifs et leurs preuves de sécurité n'ont pas encore atteint le degré de sophistication qui est maintenant la norme pour le scénario dépendant des dispositifs. En particulier, des efforts sont nécessaires pour améliorer l'efficacité des protocoles de distribution des clés, et pour identifier les conditions dans lesquelles des dispositifs non éprouvés peuvent être réutilisés sur de multiples cycles de ces protocoles.

Les fondements quantiques du principe de chiffrement décrit ici sont aussi sujets à des interrogations. Nous avons implicitement supposé qu'il n'y a rien au-delà de la théorie quantique. Cependant, si Alice et Bob sont assez paranoïaques pour supposer qu'Ève a des capacités «postquantiques» (des technologies plus puissantes que les technologies quantiques, reposant sur des phénomènes physiques non encore découverts et non décrits par la physique quantique), ils peuvent encore avoir recours à des protocoles moins efficaces, mais ne reposant pas sur la théorie quantique *(voir l'article de Phong Nguyen page 36)*.

BIBLIOGRAPHIE

G. Brassard, **Cryptography in a quantum world**, *Lecture Notes in Computer Science* [Springer], vol. 9587, pp 3-16, 2016.

B. Hensen *et al.*, **Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers**, *Nature*, vol. 526, pp. 682-686, 2015.

A. Ekert et R. Renner, **The ultimate physical limits of privacy**, *Nature*, vol. 507, pp. 443-447, 2014.

C. Bennett *et al.*, **La cryptographie quantique**, *Dossier Pour la Science*, n° 36, juillet-octobre 2002.

A. Ekert, **Quantum cryptography based on Bell's theorem**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, n° 6, pp. 661-663, 1991.

Par ailleurs, le système de chiffrement quantique décrit ici repose surtout sur la violation des inégalités de Bell et le caractère non local de l'intrication quantique. Celui-ci est un fait expérimental confirmé par de nombreuses équipes. Pour convaincantes qu'elles soient, ces expériences laissent ouvertes certaines brèches. Par exemple, il est en principe possible que les photons détectés dans les expériences ne constituent pas un échantillon représentatif de tous les photons émis par la source («échappatoire de détection») ou que les différentes parties ou composantes de l'expérience aient été causalement reliées («échappatoire de localité»).

L'expérience d'Alain Aspect, en 1982, par exemple, utilisait deux instruments suffisamment éloignés l'un de l'autre pour éviter qu'une communication à la vitesse de la lumière fausse les résultats des mesures. Mais cette expérience souffre de l'échappatoire de détection. En effet, tous les photons intriqués n'arrivent pas aux détecteurs, car certains sont absorbés en chemin. Comment garantir que le sous-groupe des photons qui arrivent aux détecteurs est représentatif de tous les photons émis ? Il est très difficile de combler la faille de détection, parce que presque tout composant optique ajoute des pertes et des imperfections au dispositif.

Il y avait peu de chance que la nature soit assez malveillante pour nous tromper de manière sélective – par l'échappatoire de localité dans certaines expériences, et par l'échappatoire de détection dans d'autres. En revanche, rien n'empêche un espion d'être trop curieux. Et il pourrait exploiter ces échappatoires à son profit.

Des expériences sans échappatoire

En 2013, l'équipe d'Anton Zeilinger, de l'université de Vienne, et celle de Paul Kwiat, de l'université de l'Illinois, ont montré qu'il était possible de contrôler l'échappatoire de détection. Mais sans garantir l'échappatoire de localité... Une autre expérience, mise au point en 2015 par l'équipe de Ronald Hanson, de l'université de Delft, aux Pays-Bas, contrôle les deux échappatoires. Ainsi, nous pouvons être rassurés sur la violation des inégalités de Bell et la fiabilité de la cryptographie quantique indépendante des dispositifs.

Cette dernière est tout sauf facile à mettre en pratique, mais les progrès technologiques réalisés jusqu'à présent portent à l'optimisme *(voir l'encadré page 33)*.

Depuis une quinzaine d'années, la cryptographie quantique a beaucoup évolué et de nombreux travaux ont renforcé la fiabilité du système. Elle est aussi une source d'inspiration très fertile pour la recherche fondamentale. La quête des limites ultimes de la confidentialité est encore en chantier, mais nous savons que l'on peut garantir la confidentialité sous des hypothèses étonnamment faibles. Les corrélations monogames, de quelque origine qu'elles soient, assorties à une quantité arbitrairement faible de libre arbitre, suffisent à dissimuler tout ce que nous voulons. Le libre arbitre est notre atout le plus précieux. Et à bien y réfléchir, s'il n'y a pas de libre arbitre, à quoi bon cacher quoi que ce soit de toute façon ? ■

La cryptographie de demain

Phong Nguyen

La cryptographie à clé publique utilisée aujourd'hui sera obsolète si l'ordinateur quantique devient une réalité. Toutefois, des méthodes alternatives, dites postquantiques, sont déjà à l'étude.

Si un ordinateur quantique voyait le jour, son impact sur les techniques cryptographiques déployées aujourd'hui serait considérable. Les deux fonctionnalités les plus menacées par ses capacités de calcul sont le chiffrement à clé publique et la signature numérique.

Le chiffrement à clé publique est très utilisé sur Internet, notamment pour sécuriser le commerce électronique en protégeant les numéros de carte bancaire. Lorsque vous envoyez un tel numéro à un destinataire, vous le chiffrez en utilisant la clé publique que votre interlocuteur vous transmet. Cette clé sert à chiffrer, mais pas à déchiffrer le numéro : seul le destinataire peut retrouver le numéro initial en utilisant une clé privée, qui a servi à définir la clé publique. Il est théoriquement possible de retrouver la clé privée à partir de la clé publique, mais difficile en pratique... sauf avec les algorithmes qu'un ordinateur quantique pourra utiliser.

La signature numérique sert surtout à authentifier des logiciels téléchargés (sur téléphone mobile ou sur ordinateur), les clés de chiffrement et les sites internet.

Comment anticiper le jour où le chiffrement à clé publique et la signature numérique ne seront plus sûrs ? Un texte chiffré pourrait être stocké aujourd'hui pour être décrypté demain par un ordinateur quantique. La cryptographie quantique *(voir l'article d'Artur Ekert et Renato Renner, pages 26 à 35)* ne répond que très partiellement à cette question, car elle ne fournit ni signature, ni chiffrement à clé publique, mais offre seulement un certain type d'échange de clés, ce qui est insuffisant pour beaucoup d'applications courantes. Pour résister à l'attaque d'un ordinateur quantique, il existe actuellement quatre approches, qualifiées de postquantiques : la cryptographie à base de hachage, la cryptographie multivariable, celle à base de codes correcteurs et celle à base de réseaux.

Les fonctions de hachage sont répandues en cryptographie ; elles servent par exemple à protéger les mots de passe. Ces fonctions associent à tout message une petite chaîne de caractères : l'empreinte. En cryptographie, les fonctions de hachage utilisées doivent être à sens unique, c'est-à-dire qu'il doit être impossible de retrouver un message à partir de son empreinte.

Les fonctions de hachage ne permettent pas à elles seules de fournir un chiffrement à clé publique. En revanche, il a été montré qu'elles sont suffisantes pour construire des signatures numériques sûres (même si ces dernières ont l'inconvénient d'être volumineuses). En 1979, l'informaticien américain Leslie Lamport a en effet proposé une méthode pour signer un message grâce au hachage. On choisit d'abord des nombres aléatoires qui forment la clé privée du signataire : les empreintes de chacun des nombres de la clé privée par la fonction de hachage constituent la clé publique. La

signature est un sous-ensemble de la clé privée dépendant du message. Pour vérifier la signature, on hache chacun de ses éléments et on vérifie qu'on obtient le bon sous-ensemble de la clé publique.

La signature de Lamport est simple à mettre en œuvre, mais elle ne peut être utilisée qu'une fois, pour des raisons de sécurité, car elle révèle une partie de la clé privée. Pour signer plusieurs messages, l'Américain Ralph Merkle a inventé ce qu'on nomme aujourd'hui des arbres de hachage, dans lesquels on passe d'un niveau à un autre en appliquant la fonction de hachage. Les arbres de hachage sont couramment utilisés : on les trouve dans la monnaie virtuelle bitcoin et dans les réseaux pair à pair, pour vérifier l'intégrité d'une partie d'un fichier par exemple.

Une autre approche est la cryptographie multivariable, développée dès 1988 sous l'impulsion de deux chercheurs japonais, Tsutomu Matsumoto et Hideki Imai. Elle repose sur la difficulté à résoudre des systèmes d'équations polynomiales à plusieurs inconnues. Au lycée, on apprend à résoudre une équation du second degré à une seule variable. Ce problème devient très difficile lorsque le nombre de variables et le nombre d'équations sont élevés.

Dans le cas d'une signature multivariable, la clé publique est un système d'équations polynomiales ; le message définit le second membre de ce système d'équations, et la signature d'un message n'est autre qu'une solution du système avec second membre. Ainsi, on vérifie la validité d'une signature en vérifiant qu'elle est bien solution du système. La cryptographie multivariable s'applique au chiffrement à clé publique et aux signatures numériques de façon assez efficace.

Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les systèmes d'équations utilisés ont des structures cachées qui, découvertes, constituent des brèches : de nombreux systèmes multivariables ont ainsi été cassés, à commencer par le système de Matsumoto-Imai, contre lequel Jacques Patarin, de l'université Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines, développa une attaque astucieuse en 1995. Un autre cas d'école est la signature numérique Sflash, conçue en 2001 par des chercheurs de la société Schlumberger, et recommandée par le projet européen NESSIE en 2003. Elle a été cassée en 2007 par les cryptographes Vivien Dubois, Pierre-Alain Fouque, Adi Shamir et Jacques Stern.

Enfin, la cryptographie à base de codes correcteurs et celle à base de réseaux reposent sur des problèmes assez voisins : filtrer du bruit. On cache un élément dans un code correcteur d'erreurs (des objets mathématiques très structurés) ou bien dans un réseau euclidien (un arrangement régulier de points dans l'espace à n dimensions) en lui ajoutant du bruit. Il est alors difficile de retrouver l'élément, c'est-à-dire d'enlever le bruit. Dans l'exemple des réseaux, l'élément est un point du réseau, et on le bruite en le déplaçant légèrement : quand la dimension augmente et que le réseau n'est pas trop particulier, il est très difficile de retrouver la perturbation. Cela permet de construire assez naturellement un chiffrement à clé publique : c'est ce qu'a fait Robert McEliece dès la fin des années 1970 pour les codes correcteurs. Fondé sur la même idée, le chiffrement à base de réseaux NTRU est peut-être le chiffrement à clé publique le plus rapide du monde.

L'Institut américain des normes et de la technologie a lancé un appel international pour normaliser ces algorithmes postquantiques

Malgré leurs similitudes, les codes correcteurs et les réseaux euclidiens ont des différences significatives. Par exemple, on connaît des signatures à base de réseaux très efficaces, contrairement au cas des codes correcteurs. Et les réseaux euclidiens offrent des fonctionnalités que n'a pas la cryptographie traditionnelle : on peut citer le cas du chiffrement complètement homomorphe, qui permet d'effectuer des opérations arbitraires sur des données chiffrées sans que l'on connaisse la clé secrète. Pour toutes ces raisons, la cryptographie à base de réseaux est la méthode postquantique la plus étudiée à l'heure actuelle.

Ces quatre approches postquantiques ont des avantages et des défauts. En février 2016, le NIST (l'Institut américain des normes et de la technologie) a lancé un appel international pour normaliser ces méthodes postquantiques. Cette initiative permettra peut-être de déterminer l'approche la plus adaptée pour remplacer les systèmes de cryptographie à clé publique utilisés aujourd'hui, tel RSA. ■

L'AUTEUR


Phong NGUYEN est directeur de recherche à l'Inria et dirige le laboratoire franco-japonais d'informatique du CNRS.

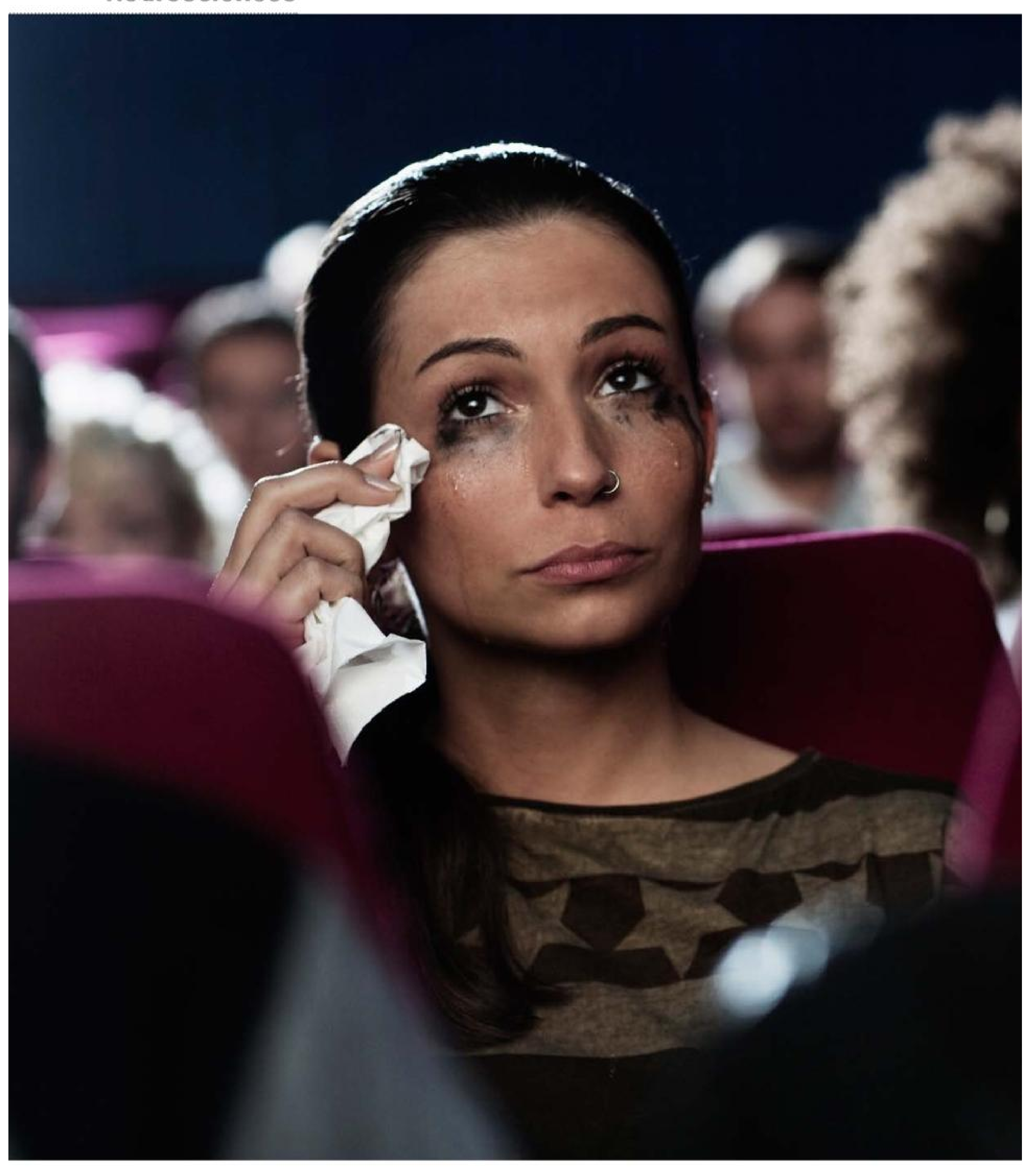
BIBLIOGRAPHIE

National Institute of Standards and Technology, **Report on Post-Quantum Cryptography**, Internal Report 8105, 2016.

P. Q. Nguyen et B. Vallée (éd.), **The LLL Algorithm, Survey and Applications**, Springer, 2010.

D. J. Bernstein *et al.* (éd.), **Post-Quantum Cryptography**, Springer, 2009.

P. Nguyen, **La géométrie des nombres : de Gauss aux codes secrets**, *Dossier Pour la Science*, n° 36, juillet-octobre 2002.



Pourquoi les acteurs nous font vibrer

Gabriele Sofia

Les scientifiques ont montré que lorsque nous regardons un spectacle, notre cerveau et notre corps réagissent d'une façon bien particulière. Nous irions même jusqu'à simuler les actions représentées...

L'ESSENTIEL

- Des chercheurs ont effectué diverses mesures physiologiques sur des spectateurs pendant qu'ils regardaient une pièce de théâtre ou un spectacle de danse.
- Ils ont montré que des zones cérébrales essentielles pour comprendre les personnages et l'histoire s'activaient. Leurs résultats suggèrent aussi que le système psychomoteur des spectateurs simule les actions représentées.
- Cette « résonance physiologique » serait plus intense quand on assiste au spectacle au lieu de le regarder en vidéo.

Avec la découverte des neurones miroirs, les neurosciences commencent à comprendre ce que le théâtre sait depuis toujours ! C'est par cette citation du metteur en scène Peter Brook que débute l'ouvrage intitulé *Les Neurones miroirs*, publié en 2006. Ce livre, écrit par le philosophe Corrado Sinigaglia, de l'université de Milan, et le neuroscientifique Giacomo Rizzolatti, de l'université de Parme, est le premier à décrire ces étonnants neurones qui s'activent de la même façon quand on réalise une action et quand on la regarde faire.

La découverte des neurones miroirs, il y a une vingtaine d'années, a eu un retentissement considérable chez les scientifiques, soulevant de multiples questions et inspirant de nombreuses recherches : ont-ils joué un rôle dans l'apparition du langage ? Sont-ils impliqués dans des troubles tels que la schizophrénie et l'autisme ? Pourrait-on s'en servir pour restaurer des fonctions motrices chez des personnes atteintes de neuropathies ?

Dans le monde du spectacle aussi, ces neurones ont suscité de l'intérêt. Car « ce que le théâtre sait depuis toujours », c'est que chaque action réalisée sur scène a une résonance physique chez le spectateur. En passant au crible le cerveau et le corps de personnes en train de regarder des spectacles de théâtre ou de danse, les neuroscientifiques ont effectivement trouvé la trace de cette résonance, qui reposerait sur les neurones miroirs, donc, mais aussi sur d'autres mécanismes cérébraux. Les chercheurs commencent ainsi à comprendre pourquoi ces spectacles nous bouleversent.

Quand le spectacle hypnotise

En 2010, Marie-Noëlle Metz-Lutz, de l'Inserm, et ses collègues ont réalisé une étude pionnière, en collaboration avec le Théâtre national de Strasbourg. Les participants étaient allongés dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), tandis qu'ils regardaient une vidéo d'une pièce de théâtre grâce à des lunettes spéciales. Les chercheurs ont montré que plusieurs aires cérébrales particulières s'activaient alors, notamment celles associées à l'empathie et à la théorie de l'esprit (la capacité de se mettre à la place de l'autre), de même que celles associées à la compréhension des métaphores *(voir la figure page 41)*. Ainsi, les spectateurs s'imaginent à la place des personnages, partageant leurs émotions et leurs pensées, et cela se voit dans leur cerveau.

Plus étonnant, l'équipe de Marie-Noëlle Metz-Lutz a observé une baisse de l'activité du précunéus, une zone cérébrale intervenant dans la conscience de soi. Or

L'AUTEUR



Gabriele SOFIA est attaché temporaire d'enseignement et de recherche au département de cinéma et théâtre de l'université Paul-Valéry, Montpellier 3. Il a coordonné le colloque « Dialogue entre théâtre et neurosciences », de 2009 à 2013, à l'université La Sapienza, à Rome.

on constate aussi cette baisse dans les états d'hypnose et entraînerait une déconnexion des sensations corporelles. Le spectateur serait ainsi tout entier dans le spectacle, au point qu'il s'oublierait lui-même !

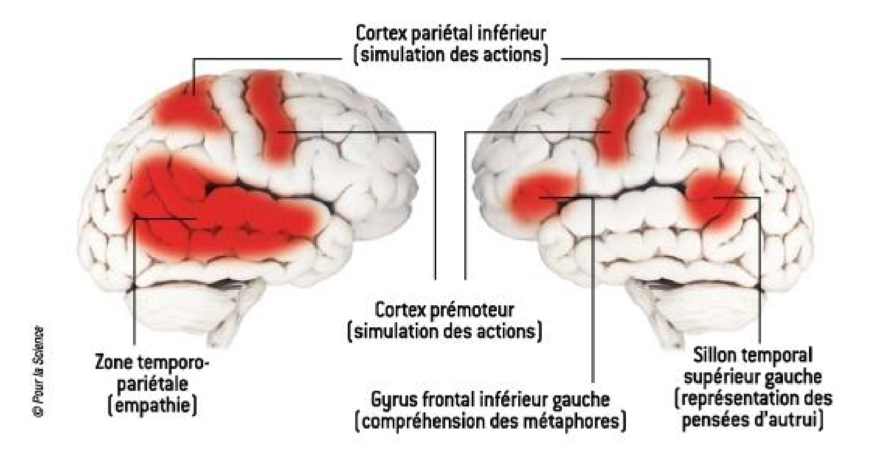
Les neurones miroirs accentueraient encore cette immersion dans un film ou une pièce de théâtre, car grâce à eux notre système psychomoteur simule en permanence les actions observées. Ces neurones ont d'abord été découverts par l'équipe de Giacomo Rizzolatti chez des singes, dans le cortex prémoteur, une zone cérébrale qui planifie les mouvements. Des électrodes implantées dans le cerveau des animaux ont révélé que certaines cellules nerveuses – les neurones miroirs – s'activaient de façon similaire quand l'animal prenait un fruit et quand il voyait quelqu'un le prendre.

Par la suite, des expériences d'imagerie cérébrale ont suggéré l'existence de neurones semblables chez l'homme. Cela a été confirmé en 2010. Lors d'expériences du même type, Roy Mukamel, alors à l'université de Californie à Los Angeles (UCLA), et ses collègues ont mesuré l'activité de plus de 1000 neurones dans le cerveau de 21 patients épileptiques, à qui on avait implanté des électrodes afin de repérer la zone d'où partaient leurs crises. Plusieurs dizaines d'entre eux étaient des neurones miroirs.

Un ballet au bout des doigts

Ces découvertes ne pouvaient qu'inspirer les neuroscientifiques qui s'intéressent au théâtre. Plusieurs équipes ont alors supposé que lorsque nous observons les acteurs, nos neurones miroirs s'activent comme si nous réalisions les mêmes actions, ce qui entraînerait l'envoi de commandes motrices aux muscles. Des neurones spécifiques de la moelle épinière inhiberaient ensuite ces commandes. Les muscles seraient tout de même animés de microcontractions, invisibles à l'œil nu, mais détectables avec des appareils appropriés.

Les chercheurs n'ont pas mesuré directement l'activité des neurones miroirs des spectateurs ni les microcontractions



DANS LE CERVEAU DU SPECTATEUR, des zones bien particulières s'activent. Ces zones interviennent dans la compréhension des métaphores, l'empathie, la capacité à imaginer ce que pense l'autre. Parallèlement, le précunéus (sur la face médiane du cerveau, non visible sur ces représentations) se désactive en partie, ce qui provoquerait une déconnexion des sensations corporelles. En outre, le spectateur simule mentalement les actions observées grâce à des neurones dits miroirs. Ceux-ci sont situés à divers endroits du cerveau, notamment dans le cortex prémoteur, responsable de la planification des mouvements, et le cortex pariétal inférieur.

musculaires, mais ils ont tout de même observé cette mobilisation de leur système psychomoteur lors d'un spectacle.

Si ces expériences concernaient le domaine de la danse, leurs conclusions sont probablement aussi valables pour le théâtre ou le cinéma. En 2013, Corinne Jola, de l'université d'Abertay en Écosse, a ainsi étudié des sujets qui soit visionnaient un ballet en vidéo, soit y assistaient. Elle a utilisé une technique indirecte, fondée sur la stimulation magnétique transcrânienne, pour évaluer à quel point les spectateurs mobilisaient leur système psychomoteur. Quand une impulsion magnétique est envoyée dans certaines zones cérébrales, le sujet a un léger mouvement rythmique du doigt ou du bras. Or ce rythme change lorsque d'autres phénomènes activent le système psychomoteur. Si ce système simule les actions observées sur scène, on doit donc détecter une telle variation de rythme.

Et c'est bien ce que l'expérience a révélé. Elle a aussi fourni un second résultat intéressant : le rythme a beaucoup plus varié chez les spectateurs présents dans la salle que chez ceux qui ont regardé le spectacle en vidéo, signe que dans le premier cas, le système psychomoteur s'engageait de façon plus intense dans la simulation des actions. Cette résonance particulièrement forte dans le cadre du spectacle vivant est peut-être due à la quantité supérieure d'informations captées par le spectateur quand il est dans la salle : il perçoit alors davantage la posture, l'engagement de tout le corps dans une action, la profondeur de l'espace où se meut le comédien... Bien sûr, le cinéma a d'autres armes, par exemple les gros plans : ces derniers montrent au spectateur des détails difficiles à percevoir au théâtre, tels les mouvements des yeux, ce qui suscite sans doute aussi des réponses physiologiques particulières.

Quand le spectateur est dans la salle, il réagit plus intensément, peut-être parce qu'il capte davantage d'informations sur le corps du comédien et la profondeur de l'espace

Certaines études suggèrent que pour bien faire « résonner » le cerveau des spectateurs, l'acteur doit construire des intentions précises pour chacune de ses actions – c'est d'ailleurs ce que demandent nombre d'écoles de théâtre, appliquant en cela les théories élaborées par le metteur en scène russe Constantin Stanislavski il y a plus d'un demi-siècle. Dans les expériences de Giacomo Rizzolatti, par exemple, tantôt le chercheur saisissait un fruit placé derrière un écran, tantôt il ne faisait que mimer le geste, aucun fruit n'étant présent. Or les neurones miroirs du singe ne s'activaient que dans le premier cas. En d'autres termes, en l'absence d'intention réelle (comme dans le second cas), ils ne s'activaient pas. Peut-être un acteur professionnel, qui aurait gardé en tête l'objectif de saisir un fruit lorsqu'il mimait le geste, aurait-il été capable d'activer les neurones miroirs du singe...

Les neurones miroirs constituent en tout cas un système très fin de discrimination des intentions – une capacité précieuse pour les animaux sociaux que nous sommes. Des expériences menées par le neurobiologiste Marco Iacoboni, de l'UCLA, en collaboration avec l'équipe de Giacomo Rizzolatti, ont ainsi révélé que lorsque nous voyons une personne saisir une tasse, des neurones miroirs différents s'activent selon que cette personne veut boire ou juste la ranger. C'est ce qui nous rend capables de comprendre son intention, immédiatement et de façon inconsciente.

Les différences d'activation des neurones miroirs résultent d'infimes nuances dans les routines motrices mises en jeu par celui qui effectue l'action – si infimes qu'il est probablement impossible de les planifier consciemment, d'où l'importance des intentions pour un acteur. Quand le personnage souhaite ranger une tasse, par exemple, le comédien qui le joue doit vraiment avoir cette intention en tête, et ce même s'il sait qu'un partenaire l'arrêtera dès qu'il aura posé la main sur l'objet.

DES ATELIERS DE THÉÂTRE CONTRE L'AUTISME ET LA MALADIE DE PARKINSON

Le théâtre n'agit pas que sur les spectateurs : il exerce aussi une influence sur les acteurs eux-mêmes. Et si cette influence était utilisée pour des applications thérapeutiques ? C'est le pari qu'ont tenté – avec succès – plusieurs expériences à travers le monde.

L'équipe de Nicola Modugno, de l'institut Neuromed, à Pozzilli, en Italie, a ainsi mis en place des ateliers de théâtre pour soigner des patients parkinsoniens. Ces ateliers comprenaient des improvisations, des exercices de voix, des jeux de rôle... Les résultats, publiés en 2011, ont révélé un effet positif sur tous les symptômes. Les problèmes de contrôle moteur ou de sommeil, par exemple, se sont atténués.

Cette efficacité est encore mal comprise, mais elle tient sans doute au fait que l'activité théâtrale engage l'être humain de manière globale : le sujet exerce à la fois ses mécanismes moteurs, émotifs, linguistiques, attentionnels... Cela représente un excellent entraînement, qui augmenterait la plasticité et la connectivité cérébrales.

L'efficacité thérapeutique du théâtre ne se limite pas à la maladie de Parkinson. Ainsi, l'équipe de Blythe Corbett, du laboratoire Sense *(Social emotional neuroscience endocrinology)*, à Nashville, aux États-Unis, a montré en 2013 que la pratique théâtrale améliore nettement la tendance à établir et à maintenir des interactions sociales chez des enfants autistes.

Une amélioration qu'ont aussi constatée les parents et les éducateurs du projet *Imagining autism*, de l'université du Kent, au Royaume-Uni, où ont été mis en place des ateliers de marionnettes et de théâtre avec des acteurs portant des masques. Grâce à ces derniers, les enfants ne seraient pas gênés par leur difficulté à décoder les expressions faciales et s'engageraient plus facilement dans une expérience sociale.



JOUER AVEC UN ACTEUR masqué ou une marionnette, comme ici dans l'expérience *Imagining autism*, aide les enfants autistes à se sociabiliser.

La difficulté est que l'intention d'un acteur ne se limite pas à celle du personnage : il doit aussi avoir au moins celle de stimuler l'attention du spectateur ! Les acteurs ont diverses techniques pour surveiller ce paramètre. Certains écoutent jusqu'au grincement des sièges sur lesquels les spectateurs sont assis, à l'affût d'un tortillement qui trahirait une certaine distraction. Ils peuvent alors par exemple jouer sur la vitesse ou l'amplitude de leurs actions pour regagner l'attention de l'auditoire. L'équation est encore compliquée par la conscience qu'ils ont d'être observés. Ces divers éléments influent sur le contrôle moteur, et tout l'art de l'acteur consiste à les intégrer en arrière-plan, sans abandonner les intentions du personnage.

L'exemple de la tasse révèle un autre aspect fondamental de la réaction du spectateur : ce dernier ne se contente pas de reproduire mentalement ce qu'il perçoit, il anticipe la suite. Quand il voit un acteur saisir la tasse, il sait ce que celui-ci va faire : la boire ou la ranger. Selon le neurophysiologiste Alain Berthoz, professeur émérite au Collège de France, « le cerveau est avant tout une machine biologique qui permet d'anticiper ». Cette capacité aurait été sélectionnée au fil de l'évolution, car elle fluidifie les interactions et aidait nos ancêtres à prévoir le comportement des prédateurs. Dans le cadre du théâtre, les anticipations qu'opère en permanence le spectateur sur les actions du comédien permettraient à ce dernier de créer des effets de surprise ou de crédibiliser diverses actions : l'acteur n'a pas besoin d'étrangler ou de frapper réellement ses comparses, il n'a qu'à commencer l'action et le spectateur la finira tout seul dans sa tête.

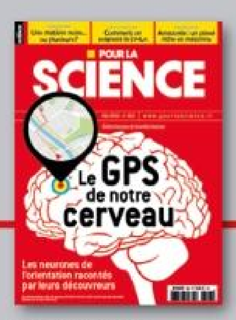
Il n'est ainsi pas étonnant que nous soyons à ce point captivés par les films ou les pièces de théâtre. Plusieurs systèmes cérébraux, configurés par des millions d'années d'évolution pour faciliter les interactions sociales et nous prémunir des prédateurs, nous poussent à entrer dans les spectacles auxquels nous assistons. Heureusement que des mécanismes inhibiteurs existent aussi, sinon nous bondirions sans cesse sur nos sièges pendant la représentation ! ■

BIBLIOGRAPHIE

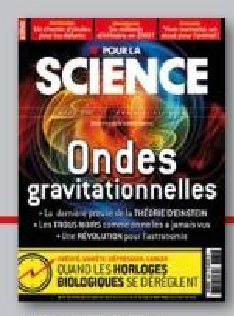
C. Falletti, G. Sofia et V. Jacono (éd.), **Theatre and Cognitive Neuroscience**, Bloomsbury, 2016.

C. Jola et M.-H. Grosbras, **In the here and now. Enhanced motor corticospinal excitability in novices when watching live compared to video recorded dance**, *Cognitive Neuroscience*, vol. 4 (2), pp. 90-98, 2013.

N. Modugno *et al.*, **Active theater as a complementary therapy for Parkinson's disease rehabilitation : A pilot study**, *The Scientific World Journal*, vol. 10, pp. 2301-2313, 2010.



N°463 - mai 2016
❑ réf. M0770463



N°462 - avril 2016
❑ réf. M0770462



N°461 - mars 2016
❑ réf. M0770461



N°460 - février 2016
❑ réf. M0770460



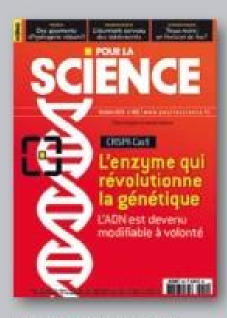
N°459 - janvier 2016
❑ réf. M0770459



N°458 - décembre 2015
❑ réf. M0770458



N°457 - novembre 2015
❑ réf. M0770457



N°456 - octobre 2015
❑ réf. M0770456



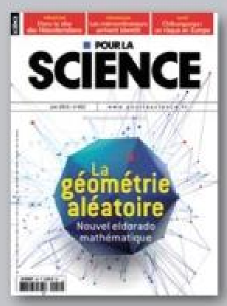
N°455 - septembre 2015
❑ réf. M0770455



N°454 - août 2015
❑ réf. M0770454



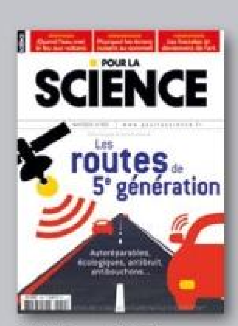
N°453 - juillet 2015
❑ réf. M0770453



N°452 - juin 2015
❑ réf. M0770452



N°451 - mai 2015
❑ réf. M0770451



N°450 - avril 2015
❑ réf. M0770450



N°449 - mars 2015
❑ réf. M0770449

Complétez votre collection dès maintenant !

Merci de découper ou photocopier ce bulletin et de le retourner accompagné de votre règlement à :

Groupe Pour la Science
628 avenue du Grain d'Or • 41350 Vineuil
e-mail : pourlasciencevpc@daudin.fr

❑ Oui, je commande des numéros de *Pour la Science* au tarif unitaire de 5,50 € dès le 2e acheté.

Je reporte ci-dessous les références à 8 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1re réf. ________	01 × 6,50 € =	6,50 €
2e réf. ________	___ × 5,50 € =	___,___ €
3e réf. ________	___ × 5,50 € =	___,___ €
4e réf. ________	___ × 5,50 € =	___,___ €
5e réf. ________	___ × 5,50 € =	___,___ €
6e réf. ________	___ × 5,50 € =	___,___ €
Frais port (4,90 € France – 12 € étranger)	+	___,___ €
Je commande **la reliure *Pour la Science*** (capacité 12 nos) au prix de **14 €**	___ × 14 € =	___,___ €
TOTAL À RÉGLER	=	___,___ €

J'indique mes coordonnées :

Nom : ____________________
Prénom : ____________________
Adresse : ____________________

C.P. : ________ Ville : ____________________
Pays : ____________ Tél. : ____________
Pour le suivi client (facultatif)

Mon e-mail pour recevoir la newsletter ***Pour la Science****:
____________ @ ____________
* À remplir en majuscules

Je choisis mon mode de règlement :
❑ par chèque à l'ordre de *Pour la Science*
❑ par carte bancaire

N° ________________
Date d'expiration ______ Code de sécurité ______
(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. **Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher la case ci-contre ❑.**

VPPLS464 • Offre valable jusqu'au 30/06/16 dans la limite des stocks disponibles

TOUTES LES ARCHIVES DEPUIS 1996 SUR
www.pourlascience.fr

Une prise de sang contre **les cancers**



François-Clément Bidard et Stéphanie Descroix

Grâce à la microfluidique – la manipulation des fluides à l'échelle microscopique –, on sait détecter des cellules cancéreuses et de l'ADN tumoral lors d'une simple prise de sang. D'ici quelques années, ces techniques devraient remplacer la biopsie des tumeurs.

Détecter très tôt l'apparition de lésions cancéreuses, avant même qu'une tumeur ait commencé à se développer ou à réapparaître après un traitement, est un peu le graal des chercheurs qui travaillent sur les cancers. Ils savent en effet que prendre le mal à sa racine conduit à l'éradiquer plus sûrement; et suivre son évolution permet aussi de savoir si un traitement fonctionne. Depuis les années 1950, afin de compléter, voire remplacer les biopsies pratiquées pour détecter l'éventuelle présence de cellules cancéreuses et les caractériser, on a mis au point des dizaines de tests non invasifs visant à doser dans le sang des marqueurs tumoraux, en l'occurrence certaines protéines, pour dépister et surveiller les cancers; c'est le cas par exemple des tests qui mesurent la concentration de l'antigène prostatique, le PSA, que le cancer de la prostate peut augmenter.


© Africa Studio/Shutterstock.com

Ces dernières années, la médecine semble être passée à la vitesse supérieure grâce à deux méthodes plus sensibles et précises : la détection de cellules tumorales vivantes qui circulent dans le sang après s'être détachées d'une tumeur, et celle d'ADN provenant de cellules cancéreuses mortes. Jusqu'alors, cette tâche était impossible, car les cellules provenant d'une tumeur éventuelle sont très rares dans le sang – quelques-unes parmi les quelque 50 millions de cellules à noyau présentes dans 10 millilitres de sang –, et l'ADN tumoral l'est tout autant. Il a fallu d'importants progrès techniques, notamment dans le domaine de la microfluidique et du séquençage de l'ADN, pour envisager aujourd'hui l'utilisation médicale de ces nouveaux marqueurs tumoraux.

L'ESSENTIEL

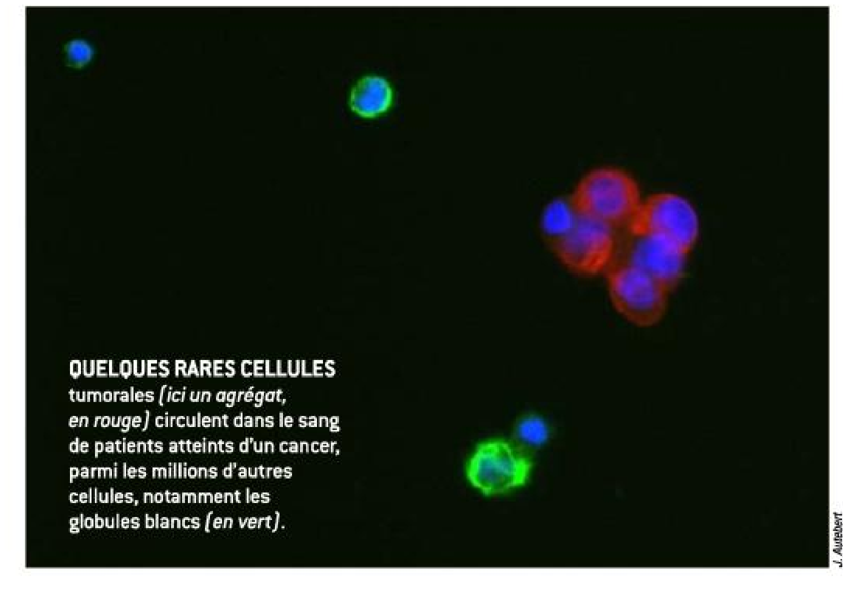
- **Actuellement, les biomarqueurs des cancers sont en général des protéines que l'on détecte par des biopsies des tumeurs.**
- **Une nouvelle génération prometteuse de biomarqueurs détectables par une simple prise de sang émerge : les cellules tumorales circulantes et l'ADN tumoral circulant.**
- **Le dépistage précoce des cancers, l'affinement de leur pronostic et la prédiction de l'efficacité d'un traitement deviennent envisageables.**

Diagnostic, pronostic et prédiction

En oncologie, la science des cancers, le terme «biomarqueur» désigne une caractéristique biologique d'une tumeur, détectable dans un organe ou dans un fluide biologique, le sang en général, mais aussi la salive, les urines et le liquide céphalorachidien. Tout constituant moléculaire de cellules tumorales est donc un biomarqueur possible de cancer, voire même les cellules entières, nommées en l'occurrence cellules tumorales circulantes (CTC). L'intérêt d'un biomarqueur est lié d'une part à sa finalité potentielle, d'autre part à son «niveau de preuve», c'est-à-dire à une évaluation de la solidité des données le concernant, qui permet de distinguer celles qui sont établies et utilisables en pratique de celles qui demeurent douteuses. Quelle que soit la finalité d'un biomarqueur, son intérêt médical doit être évalué scientifiquement *(voir l'encadré page ci-contre)*.

Les biomarqueurs visent trois objectifs. Certains sont utilisés comme aide au diagnostic : il s'agit de détecter un type de cancer chez un patient ou dans une population donnée, par exemple un cancer bronchopulmonaire chez les fumeurs. D'autres aident à effectuer le pronostic de la maladie. Ils renseignent alors sur l'évolution plus ou moins agressive d'une tumeur déjà diagnostiquée : on estime par exemple, en l'absence de métastases – les foyers cancéreux secondaires développés à distance de la tumeur primitive –, le risque futur de rechute ou, en présence d'un cancer incurable, sa vitesse d'évolution. Les biomarqueurs pronostiques n'ont un intérêt que s'il existe plusieurs traitements possibles, par exemple des chimiothérapies plus ou moins intensives que l'on adaptera à l'agressivité du cancer.

Enfin, les biomarqueurs les plus activement recherchés en oncologie sont ceux qui prédisent la sensibilité d'une tumeur. Ils indiquent que la tumeur a une probabilité importante d'être sensible (idéalement 100 %), ou à l'inverse résistante, à un traitement donné. L'un des exemples les plus connus est l'expression de récepteurs hormonaux dans le cancer du sein : lorsque des récepteurs aux œstrogènes et des récepteurs à la progestérone sont présents à la surface des cellules tumorales, le cancer sera très vraisemblablement sensible à l'hormonothérapie, dont le tamoxifène est un médicament représentatif. En revanche, les cancers du sein dépourvus de ces récepteurs sont résistants à ce même traitement, et il faut alors en envisager un autre.



QUELQUES RARES CELLULES tumorales *(ici un agrégat, en rouge)* circulent dans le sang de patients atteints d'un cancer, parmi les millions d'autres cellules, notamment les globules blancs *(en vert)*.

J. Autebert

Des cellules cancéreuses entières comme biomarqueur

Ces cinq dernières années, plusieurs études ont confirmé que les cellules tumorales circulantes retrouvées dans le sang et l'ADN tumoral circulant fourniraient des informations importantes pour détecter des cancers et optimiser les traitements. En d'autres termes, une simple prise de sang suffirait.

Les cellules tumorales se détachent de cancers dits solides – cancers du sein, du poumon, de la prostate, digestifs, etc. – par

opposition aux leucémies. Une tumeur émet des cellules cancéreuses, dont certaines pénètrent dans des vaisseaux sanguins. Encore vivantes, elles sont alors entraînées dans la circulation sanguine et s'arrêtent parfois dans d'autres organes, où elles conduisent à l'apparition de métastases. On distingue ces cellules tumorales circulantes des autres cellules à noyau du sang (les globules blancs) par leur plus grande taille ou par la présence à leur surface de molécules spécifiques, des antigènes de tumeur.

Les données expérimentales obtenues chez la souris montrent que la plupart meurent en quelques heures dans la circulation sanguine. Cependant, il arrive qu'une petite fraction survive dans un organe distant et y reste au repos, sans proliférer, parfois des années. À ce stade, ces cellules tumorales sont désignées sous le terme de micrométastases. Après cette étape de dormance, dont la régulation est mal connue, elles recommencent à proliférer sous l'effet de déclencheurs de nature encore indéterminée. Ce «réveil» conduit à la formation d'une nouvelle tumeur dans un organe distant du site initial – une métastase. Celle-ci grandit et peut former à son tour d'autres métastases qui vont à terme compromettre la fonction des organes où elles croissent et entraîner le décès du patient.

En quête de mutations caractéristiques

Et l'ADN tumoral circulant? Il provient aussi des masses tumorales solides. En revanche, il est largué dans le sang par un mécanisme biologique très différent: la mort de cellules cancéreuses. Cette mort est spontanée, du fait par exemple de l'insuffisance d'apport en oxygène ou en nutriments, ou elle se produit sous l'action de la chimiothérapie ou de la radiothérapie. L'ADN des cellules qui meurent est très fragmenté et reste intact dans le sang une heure environ avant d'être dégradé. Les fragments sont des «déchets» et n'exercent aucun rôle biologique connu à ce jour. Cependant, ils ont un intérêt majeur: ils portent la signature génétique des cellules cancéreuses dont ils proviennent.

Compte tenu de leur faible quantité dans le sang, les cellules tumorales circulantes et l'ADN tumoral circulant ne sont devenus des biomarqueurs tumoraux potentiels que depuis quelques années grâce à des progrès techniques qui ont fortement accru la sensibilité et la spécificité de leur détection dans le sang. C'est le cas notamment des techniques microfluidiques *(voir l'encadré page 48)*.

Les quantités de cellules tumorales circulantes et d'ADN tumoral circulant détectables sont toutes deux liées au volume de la tumeur. Néanmoins, elles ne reflètent pas forcément des tumeurs au même stade. La dissémination de cellules tumorales circulantes dans le sang n'intervient que si la tumeur initiale s'est suffisamment développée. Alors seulement les cellules circulantes deviennent plus nombreuses avec le développement de la tumeur, à l'approche d'un processus métastatique. En d'autres termes, plus ces cellules sont nombreuses à être détectées, plus la présence de métastases est probable. En revanche, la quantité d'ADN tumoral circulant dérive des mécanismes de mort cellulaire dans la tumeur, qui se produisent assez vite lorsque celle-ci se

LES AUTEURS




François-Clément BIDARD est médecin-chercheur dans le département d'oncologie médicale associé au Site de recherche intégrée sur le cancer (SiRIC) de l'institut Curie, à Paris.

Stéphanie DESCROIX est chargée de recherche CNRS à l'institut Curie dans l'unité de physicochimie (CNRS UMR 168), à l'université Pierre-et-Marie-Curie et à l'institut Pierre-Gilles-de-Gennes (IPGG), au sein de Paris Sciences et Lettres (PSL).

Valider un biomarqueur

Selon la médecine fondée sur les faits *(evidence-based medicine)*, l'intérêt médical d'un biomarqueur est évalué en analysant trois critères successifs: sa validité analytique, sa validité clinique et son utilité clinique. Le développement d'un biomarqueur jusqu'à son emploi en médecine requiert de ce fait plusieurs années.

La validité analytique correspond à la fiabilité de la mesure: la technique de détection du biomarqueur doit fournir le même résultat avec une faible marge d'erreur si un même échantillon est analysé plusieurs fois au sein d'un même laboratoire ou dans différents laboratoires.

La validité clinique évalue la qualité de l'association entre le biomarqueur et ce qu'il est censé indiquer. On étudie par exemple sur de vastes cohortes de patients sa capacité à distinguer les patients qui resteront indemnes de toute rechute de ceux qui subiront une évolution métastatique de leur tumeur au cours des années suivant le traitement initial. Il est alors souhaitable de démontrer que l'association observée est supérieure (ou complémentaire) à celle issue des critères habituellement utilisés pour décider du traitement.

L'utilité clinique est l'intérêt médical réel du biomarqueur. Sa démonstration reste l'étape la plus difficile à franchir pour que l'on décide de s'en servir à l'hôpital. Il s'agit de montrer que, lorsque le biomarqueur est pris en compte, la prise en charge médicale est améliorée: moins de rechute métastatique, moins d'argent dépensé, une meilleure qualité de vie, etc. De nombreux biomarqueurs cliniquement validés n'ont pas d'utilité médicale démontrée. Les tests correspondants ne sont donc pas remboursés par les systèmes de santé.

Lors des démonstrations de la validité et de l'utilité cliniques, l'objectivité et la solidité des données sont évaluées selon des échelles de **niveaux de preuve**. Les études rétrospectives de quelques cas sélectionnés correspondent au plus mauvais niveau de preuve (niveau 5). À l'inverse, les études prospectives internationales reposant sur des centaines de patients, et comparant les stratégies thérapeutiques avec et sans biomarqueur, constituent le meilleur niveau de preuve d'utilité clinique (niveau 1).

Apparue il y a une vingtaine d'années, la microfluidique suscite de nombreux espoirs. Définie initialement comme l'étude et la manipulation de fluides dans des canaux de dimensions micrométriques, la microfluidique est un champ interdisciplinaire qui allie les micro et nanotechnologies à la physique, la chimie et la biologie. L'une de ses problématiques est de développer des systèmes de la taille d'une carte de crédit – des « laboratoires sur puce » – intégrant l'ensemble des opérations d'analyse habituellement réalisées en laboratoire (séparation, identification, quantification des molécules d'un échantillon...).

Depuis plusieurs années, la microfluidique a montré tout son potentiel dans la détection des cellules tumorales circulantes, en particulier grâce à des puces capables de trier les événements rares que représentent de telles cellules au sein de la multitude d'éléments non spécifiques que sont les globules blancs, les globules rouges et les plaquettes du sang. Il est possible à la fois de structurer les systèmes microfluidiques jusqu'à des dimensions nanométriques et de tirer parti des écoulements particuliers à l'échelle micrométrique pour trier les cellules en fonction de leur taille ou grâce à des antigènes présents à leur surface.

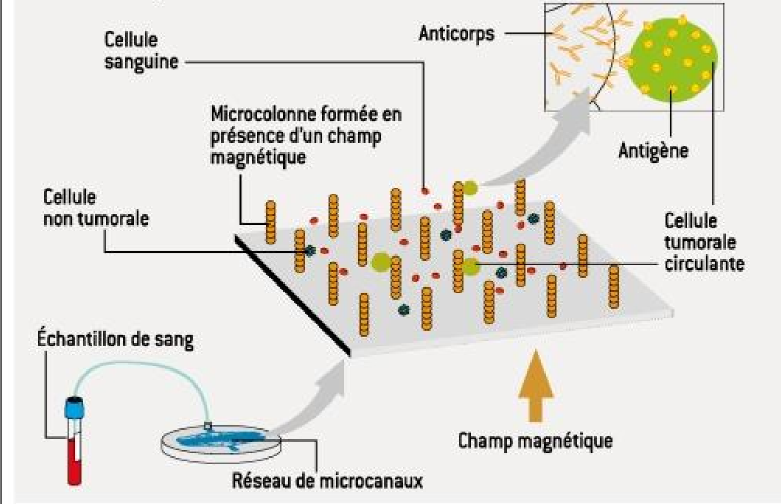
Ainsi, grâce au dispositif microfluidique Ephesia *(voir la figure ci-dessous)*, développé dans les années 2000 et validé cliniquement par l'équipe de Jean-Louis Viovy à l'institut Curie et à l'IPGG, il est possible de capturer très efficacement les cellules tumorales contenues dans le sang de patients atteints de cancers métastatiques. On recherche ensuite sur ces cellules des anomalies génétiques prédictives de l'efficacité des traitements. L'ensemble de ces étapes est réalisé dans une puce microfluidique grande comme une carte de crédit.

La microfluidique s'est aussi imposée comme une technologie de choix pour l'analyse de l'ADN tumoral circulant. Il s'agit, comme avec les cellules, d'analyser quelques rares fragments d'ADN tumoral dans un océan d'ADN normal issu de cellules saines. Pour cela, des millions de gouttelettes d'eau de quelques picolitres (10^{-12} litre) sont créées dans de l'huile, chacune d'elles ne contenant qu'une seule molécule d'ADN – c'est un point clé *(voir la figure ci-dessus)*.

L'ADN contenu dans chaque gouttelette est alors amplifié par PCR (réaction en chaîne par polymérase), une technique de biologie moléculaire qui duplique en grand nombre une séquence d'ADN. Ainsi amplifié, l'ADN devient détectable. Cet ADN est soit normal soit muté, résultat que l'on peut « coder » en 0 ou 1, d'où l'appellation de microfluidique « digitale » (à deux solutions).

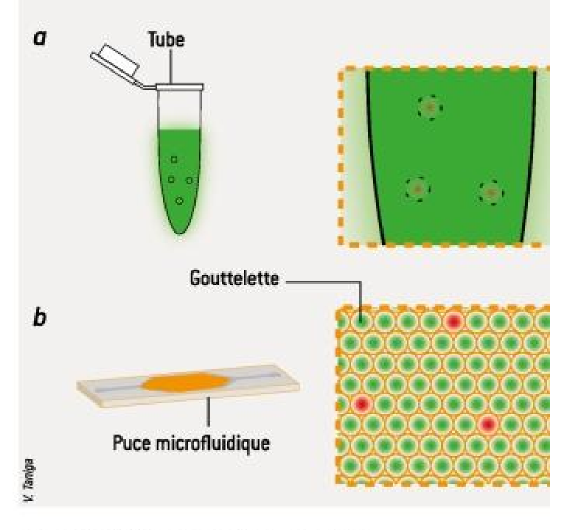
LE SYSTÈME MICROFLUIDIQUE EPHESIA

Le nom donné à cette technologie vient du temple d'Artémis à Éphèse, dont les colonnes ont été la proie de nombreuses destructions suivies de reconstructions. Dans ce dispositif, des microbilles magnétiques *(en orange)* portent un anticorps spécifique dirigé contre une protéine de surface propre aux cellules tumorales circulantes (antigène). Elles sont injectées dans des microcanaux dont le fond est tapissé de points d'encre magnétique. Soumises à un champ magnétique, elles forment spontanément des microcolonnes à partir de ces points d'encre magnétique (destructibles et reconstructibles à l'envi sous l'action de ce champ magnétique, comme celles du temple d'Artémis). Les différentes cellules injectées dans la puce microfluidique se « cognent » aux colonnes. Les cellules tumorales circulantes *(en vert)* sont capturées grâce à l'interaction des anticorps et de l'antigène tumoral, alors que les autres cellules sanguines *(en rouge et en bleu)* sont évacuées de la puce.



LA PCR DIGITALE EN GOUTTELETTES

Jusqu'à présent, pour analyser les mutations de molécules d'ADN d'un échantillon, celles-ci sont mélangées dans un même tube, qu'elles soient mutées ou normales *(a)*. L'amplification par PCR (réaction en chaîne par polymérase) préalable à la détection garde les mêmes proportions entre ADN muté et ADN normal. Le signal de l'ADN muté est alors noyé dans celui des ADN sains. Dans l'approche microfluidique *(b)*, chaque molécule d'ADN est encapsulée dans une gouttelette. Pour ce faire, après avoir extrait et quantifié l'ADN présent dans le sang du patient, on le dilue de telle façon qu'on encapsule



0 ou 1 molécule par gouttelette selon la distribution statistique de Poisson. Cette encapsulation se fait grâce à une puce microfluidique dédiée qui permet de former des gouttelettes d'eau dans l'huile. Après amplification par PCR, chaque gouttelette contient donc un grand nombre de copies soit d'ADN normal, soit d'ADN muté. Cette technique est dite digitale, car les gouttelettes n'ont finalement que deux types de fluorescence possible, correspondant au statut muté ou non de la molécule d'ADN initialement introduite dans la gouttelette.

Toutes les molécules d'ADN sont amplifiées ensemble.

Chaque gouttelette contient une molécule d'ADN, qui est amplifiée séparément.

ADN normal

ADN tumoral

Avec cette approche, des événements rares tels que la présence d'ADN tumoral circulant ne sont plus dilués dans le bruit de fond de l'ADN normal, comme ce serait le cas dans une analyse classique. Ils deviennent détectables. Il est alors possible de réaliser dans ces gouttelettes toutes les étapes classiques de l'analyse de mutations.

Par ce processus de digitalisation, l'équipe de Pierre Laurent-Puig, de l'unité Inserm UMR-S775 et de l'hôpital européen Georges Pompidou, a démontré en 2013 qu'une seule copie mutée du gène KRAS (impliqué dans le cancer du côlon) était détectable parmi 200 000 copies non mutées du même gène. Ainsi, la microfluidique de gouttes combine les avantages de la digitalisation, de la miniaturisation et du haut débit pour l'analyse de l'ADN tumoral circulant.

développe. Elle peut donc caractériser la présence d'une tumeur primitive.

Dans ces conditions, comment tirer parti de ces deux biomarqueurs pour le diagnostic des cancers ? Pour le comprendre, replaçons-nous dans le contexte de la prise en charge médicale actuelle. Face à une anomalie de l'examen clinique, les médecins réalisent un ou plusieurs examens de radiologie, par exemple un scanner. Si une anomalie radiologique est jugée évocatrice d'un cancer, une biopsie diagnostique est entreprise : on prélève un fragment de la masse suspecte à l'aide d'une aiguille spéciale, voire par une opération chirurgicale.

Les biopsies sont des examens de routine, mais présentent de nombreux inconvénients : coûteuses pour le système de santé, éventuellement douloureuses, elles entraînent dans de très rares cas des complications graves, par exemple des saignements liés au passage de l'aiguille de ponction. Les biopsies demandent par ailleurs du personnel médical entraîné et doivent parfois être faites à l'hôpital. Dans ce contexte, on pourrait imaginer de les remplacer par la recherche de cellules tumorales circulantes ou des mutations génétiques caractéristiques d'un cancer dans l'ADN circulant, sur simple prise de sang. En cas de détection de mutations caractéristiques d'un cancer du pancréas, par exemple, il ne serait plus nécessaire de réaliser la biopsie d'une masse pancréatique suspecte pour poser le diagnostic.

Peu d'études ont été réalisées dans ce sens sur les cellules tumorales circulantes, et la plupart sont revenues négatives. Une exception, cependant, a été observée par l'équipe de Paul Hofman au CHU de Nice, à l'automne 2014. Ces chercheurs ont utilisé une technique de filtration du sang qui permet de ne retenir que les plus grosses cellules, dont font partie les cellules tumorales circulantes – une technique différente de celles précédemment utilisées, qui reposaient sur des propriétés biologiques (expression de protéines membranaires). Résultat : dans le sang de 5 patients parmi 245 personnes présentant le risque de développer un cancer du poumon, des cellules tumorales circulantes ont été détectées un à quatre ans avant l'apparition d'une masse tumorale visible au scanner. Les patients ont été opérés et ne montraient aucun signe de récidive un an après. Ce résultat, s'il est confirmé de manière indépendante, permettrait d'utiliser la détection de cellules tumorales pour dépister une tumeur initiale chez des patients dont le risque est avéré. Fin 2015, Paul Hofman a lancé une nouvelle étude avec la même technique, le projet Air, cette fois-ci sur 600 personnes à risque. Les résultats sont attendus pour 2019.

L'utilisation diagnostique de l'ADN tumoral circulant semble encore plus prometteuse. Un cas anecdotique mais illustratif a été rapporté en 2013 par une équipe du Cancer Research UK Cambridge Institute : une patiente traitée successivement pour deux types de cancers, l'un de l'ovaire, puis l'autre du côlon, avait, des années après, plusieurs métastases. L'analyse de l'ADN tumoral circulant a permis de retrouver des mutations génétiques similaires à celles du cancer de l'ovaire, alors que les mutations du cancer du côlon, différentes, étaient absentes. Cette signature a guidé le choix thérapeutique vers les chimiothérapies les plus actives sur les métastases d'origine ovarienne. On voit ici que cette approche dite de biopsie liquide, où la prise de sang remplace la biopsie classique des masses tumorales, serait utile chez les patients ayant un antécédent de cancer susceptible de récidiver.

Les cellules tumorales circulantes : un intérêt pronostique majeur

Pour une utilisation dans la population générale, sans antécédent de cancer, ce type d'application diagnostique nécessite des techniques de détection extrêmement sensibles – pour ne pas rassurer faussement un patient vraiment porteur d'un cancer (faux négatif) – et spécifiques – pour ne pas diagnostiquer un cancer chez un sujet en réalité indemne (faux positif). De telles sensibilités et spécificités ne sont pas encore atteintes, mais pourraient l'être dans les années à venir avec les améliorations continues des techniques de séquençage.

La donne est assez différente s'agissant du pronostic. Plus il y a de cellules tumorales circulantes, plus un cancer semble devoir évoluer rapidement et être à l'origine de rechutes et de nouvelles métastases. Les cellules tumorales circulantes constituent de ce fait un biomarqueur pronostique majeur en cancérologie. Toutefois, le niveau de preuve soutenant cette validité pronostique varie selon le nombre d'études réalisées et donc selon le type de cancer :

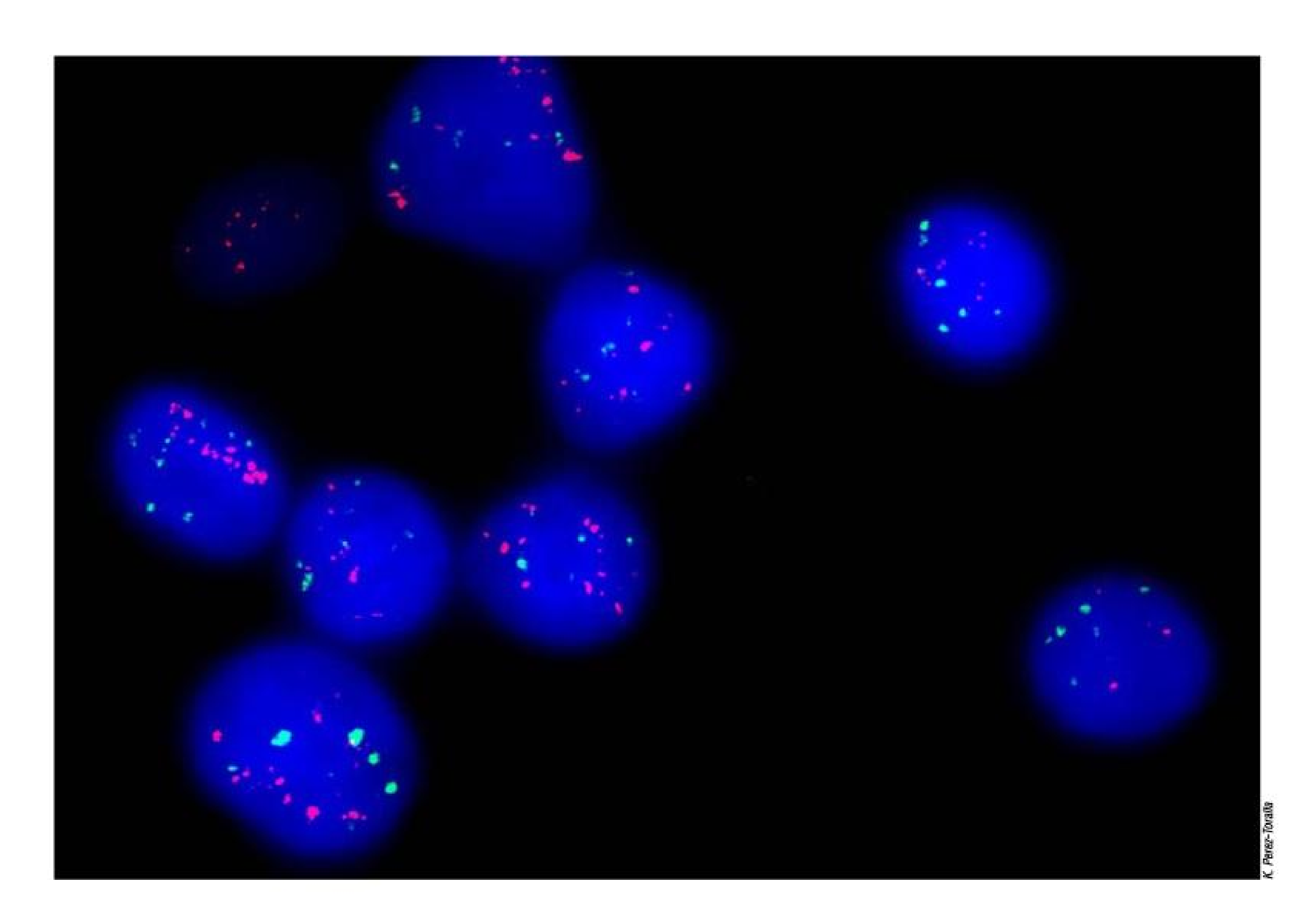
actuellement, la certitude est indiscutable dans les cancers métastatiques du sein et de la prostate, intermédiaire dans les cancers métastatiques du côlon et pulmonaires, et faible dans les cancers plus rares.

Plus intéressant encore, les variations précoces du nombre de cellules tumorales circulantes au cours d'une chimiothérapie renseignent sur l'évolution des patients atteints de cancers du sein, de la prostate ou du côlon, au stade métastatique. Pour ces cancers, moins il y a de cellules tumorales circulantes avant le début d'un traitement, plus l'évolution spontanée du cancer est lente ; en outre, plus le niveau de cellules tumorales circulantes baisse en cours de traitement, plus celui-ci est efficace.

On distingue ainsi quatre types de patients, par ordre de gravité croissant : ceux dont le niveau de cellules tumorales est bas (indétectable) et le demeure durant la chimiothérapie, ce qui correspond à la meilleure situation ; les patients dont le niveau de cellules tumorales circulantes est haut initialement, mais diminue en cours de chimiothérapie, indice que celle-ci est efficace ; les patients dont le niveau de cellules tumorales circulantes est bas initialement, mais augmente pendant le traitement, situation peu favorable ; et enfin, les patients dont le niveau de cellules tumorales circulantes est haut avant traitement et le reste malgré la chimiothérapie. Dans ces deux derniers groupes, la chimiothérapie entreprise se révèle souvent un échec, le cancer augmentant de volume statistiquement plus vite que dans les deux premiers groupes de patients.

Ces observations faites et reproduites, il reste à en démontrer l'utilité clinique : l'adaptation du type de traitement à la quantité de cellules tumorales circulantes permet-elle d'améliorer la prise en charge et le devenir des patients ? C'est l'enjeu de plusieurs essais cliniques. Le premier, SWOG 0500, mené par le South-West Oncology Group américain, a été un échec cuisant. Les résultats d'autres essais sont donc attendus avec impatience : il s'agit de CirCe01 et STIC CTC, conduits en France par notre équipe à l'institut Curie, et de DETECT III, mené dans plusieurs villes d'Allemagne. Les résultats de ces trois essais seront rapportés dans les deux ans qui viennent.

L'impact pronostique de l'ADN tumoral circulant est un peu plus complexe à appréhender. En l'absence de masse tumorale visible, par exemple après qu'un cancer du sein a été opéré, sa détection signalerait la persistance de cellules cancéreuses résiduelles dans l'organisme, dont certaines meurent et libèrent de l'ADN. Cette « maladie résiduelle » serait alors susceptible de mener à une rechute ultérieure sous forme de métastases. Dans ce contexte, l'ADN tumoral circulant serait un facteur pronostique très fort. Malheureusement, les techniques actuelles ne sont pas encore



L' ANALYSE DES ANOMALIES GÉNÉTIQUES des cellules tumorales circulantes fournit une indication sur les thérapies à privilégier. Dans l'analyse ci-dessus, *via* la technique d'hybridation *in situ* en fluorescence (FISH), chaque gène d'intérêt marqué se traduit par un point coloré au sein du noyau *(en bleu)*. Dans une cellule non tumorale, le nombre de copies du gène est normal (deux copies par cellules, soit deux points de la même couleur). En revanche, dans une cellule tumorale circulante, le nombre de copies d'un gène (ici *HER2*, *points rouges*) peut considérablement augmenter, signe qu'une thérapie ciblée (en l'occurrence le trastuzumab) contre le gène perturbé pourrait être efficace.

assez sensibles pour être appliquées en routine ; il faut en effet détecter les débris d'ADN largués par quelques cellules tumorales disséminées parmi les innombrables cellules saines du corps. Néanmoins, cette piste reste prometteuse.

À l'inverse, en présence de métastases, la détection d'ADN tumoral circulant n'est pas forcément associée à une évolution défavorable : en effet, la quantité d'ADN tumoral circulant est en grande partie liée à la mort des cellules tumorales, qui influe peu sur le devenir des patients (elle peut même être le signe d'une diminution de la masse tumorale).

Repérer les mutations pour mieux cibler les thérapies

La dernière piste d'utilisation des cellules tumorales circulantes et de l'ADN tumoral circulant est la prédiction de l'efficacité d'une thérapie. Il s'agit de faire coïncider celle-ci avec un biomarqueur qui indique une sensibilité particulière à un traitement donné. Certains médicaments ne sont en effet efficaces qu'en présence de mutations génétiques spécifiques : par exemple, le trastuzumab (Herceptin®), un anticorps monoclonal, stoppe la prolifération des cellules cancéreuses du sein seulement si elles sont porteuses d'anomalies dans le gène *HER2*, qui code un facteur de croissance. Actuellement, on détermine la présence de mutations dans les cellules tumorales en effectuant une analyse génétique des cellules prélevées par biopsie des tumeurs. Mais l'ADN tumoral circulant, qui correspond à des fragments d'ADN de cellules tumorales, reflète très bien les anomalies génétiques d'un cancer donné. Dans une étude que nous avons menée à l'institut Curie en 2015, les mutations retrouvées par biopsie chez une quarantaine de patients étaient quasiment identiques à celles retrouvées dans l'ADN tumoral circulant détecté lors d'une simple prise de sang. Ainsi, l'ADN tumoral circulant devrait remplacer dans un avenir proche la biopsie pour déterminer les mutations tumorales ayant un intérêt thérapeutique.

À l'inverse, l'utilisation prédictive des cellules tumorales circulantes, qui comportent dans leur noyau de l'ADN tumoral, reste limitée du fait de leur faible nombre chez certains patients. Leur intérêt semble donc restreint aux composants ou aux anomalies génétiques, par ailleurs difficilement détectables dans le sang, telles que les changements du nombre de copies d'ADN ou les anomalies de l'ARN tumoral. Par exemple, selon une étude de 2014 de l'équipe de Jun Luo, de l'université Johns Hopkins à Baltimore, certaines formes d'ARN dans les cellules tumorales circulantes seraient associées à une résistance à l'hormonothérapie des cancers de la prostate. Là encore, cette étude préliminaire, sur quelques dizaines de patients, requiert d'être reproduite indépendamment dans de plus larges cohortes de patients pour être validée.

La biopsie liquide pourrait être utile chez les patients ayant un antécédent **de cancer** susceptible de récidiver

Malgré ces réserves, nous n'avons jamais été aussi proches de l'utilisation en routine de la « biopsie liquide » pour lutter contre les cancers. Déjà, fin 2014, une première autorisation a été donnée en Europe pour détecter des mutations d'un gène d'intérêt (*EGFR*) dans l'ADN tumoral circulant par prise de sang chez les patients atteints de cancer bronchique et dont la tumeur est inaccessible à une biopsie tumorale classique (solide). D'autres applications sont par ailleurs en cours d'exploration, telles que la détection de cancers de la bouche ou de l'oropharynx *via* des tests de détection d'ADN tumoral non plus sanguins, mais salivaires.

Outre ces aspects d'analyse, la microfluidique et la médecine s'attellent aujourd'hui à reproduire dans ces systèmes de puces microfluidiques des « organes miniaturisés » – des organes sur puce. Il s'agit de reproduire *in vitro* sur ce format de carte de crédit les fonctionnalités d'organes *in vivo*. Ce domaine soulève de nombreux espoirs, notamment pour une meilleure compréhension de mécanismes pathologiques tels ceux à l'œuvre dans le développement du cancer, mais aussi pour le criblage d'agents thérapeutiques sur ces modèles biomimétiques, qui permettent alors d'éviter l'expérimentation animale. La révolution microfluidique est en marche ! ■

■ **BIBLIOGRAPHIE**

F. C. Bidard *et al.*, **Circulating tumor cells in breast cancer**, *Molecular Oncology*, vol. 10, pp. 418-430, 2016.

J. Autebert *et al.*, **High purity microfluidic sorting and analysis of circulating tumor cells : towards routine mutation detection**, *Lab Chip*, vol. 15, pp. 2090-2101, 2015.

M. Ilie *et al.*, **« Sentinel » circulating tumor cells allow early diagnosis of lung cancer in patients with chronic obstructive pulmonary disease**, *PLoS One*, vol. 9, n° 10, e111597, 2014.

C. Alix-Panabières et K. Pantel, **Circulating tumor cells : liquid biopsy of cancer**, *Clin. Chem.*, vol. 59, n° 1, pp. 110-118, 2013.

F. C. Bidard *et al.*, **Going with the flow : from circulating tumor cells to DNA**, *Sci. Transl. Med.*, vol. 5, n° 207, pp. 207ps14, 2013.

L'ESSENTIEL

- Une exoplanète géante semble entourée d'un système d'anneaux 200 fois plus étendu que celui de Saturne.
- Les modélisations suggèrent la présence d'un satellite de la taille de Mars au cœur même des anneaux. Ce serait la première lune à être détectée en dehors du Système solaire.
- Au moyen d'observations quotidiennes et des données d'archives, astronomes professionnels et amateurs collaborent pour étudier ce système plus en détail.

Ron Miller

UN AIR DE SATURNE. Autour d'une étoile distante de 400 années-lumière, une planète géante arbore un système d'anneaux qui serait 200 fois plus étendu que celui de Saturne. Sur cette vue d'artiste, le premier plan est occupé par une lune, grande comme Mars, nichée dans les anneaux de la planète que l'on distingue au centre de l'image. L'étoile brille sur la gauche.

Une exoplanète aux anneaux **géants**



Matthew Kenworthy

Des astronomes ont découvert, autour d'une lointaine étoile, une planète dotée d'un immense système d'anneaux, et peut-être une lune.

▪ L'AUTEUR



Matthew KENWORTHY est maître de conférences en astronomie à l'observatoire de Leyde, aux Pays-Bas. Il étudie les exoplanètes et fabrique des coronographes optiques pour faciliter leur photographie.

Ces immenses anneaux seraient les premiers à être découverts en dehors du Système solaire

Ce n'est un secret pour personne, l'astronomie se développe en grande partie dans les bureaux et les observatoires où travaillent les chercheurs. Mais si vous souhaitez entendre les théories les plus fascinantes, il faut parfois s'aventurer là où les esprits baissent la garde et laissent libre cours aux idées les plus folles. Ainsi, dans l'un des meilleurs bars de Tucson, aux États-Unis, le «1702», tout près de l'observatoire Steward de l'université d'Arizona, mon collègue Eric Mamajek, de l'université de Rochester, m'a confronté à une énigme qui nous a embarqués dans une folle chasse au trésor: trouver en dehors du Système solaire la première planète munie d'anneaux. Cette quête étonnante a nécessité les télescopes les plus modernes, mais aussi des observations astronomiques datant d'un siècle. Ce faisant, nous avons trouvé non seulement un système d'anneaux plus grand que celui de Saturne, mais également ce qui semble être une lune nouvellement née.

L'histoire débute un peu plus tôt en cette année 2011 à l'université de Rochester, lorsque Eric Mamajek et son doctorant Mark Pecaut constituent un catalogue de jeunes étoiles proches de la Terre. Afin de connaître l'âge de ces astres, le duo analyse les vitesses de rotation stellaire. En effet, les étoiles jeunes tournent sur elles-mêmes plus vite que les étoiles plus âgées, et leur vitesse de rotation est obtenue en scrutant l'apparition et la disparition des taches stellaires (des régions plus sombres et plus froides à la surface de l'étoile).

L'une des prétendantes au catalogue d'étoiles jeunes n'a pas de nom, juste un code qui correspond à la campagne d'observation SuperWASP dont sont issues les données (débutée en 2004 afin de détecter des exoplanètes) et à sa position dans la constellation du Centaure: 1SWASP J140747.93-394542.6. Nous l'appellerons J1407 pour simplifier. À l'instar des autres étoiles étudiées, J1407, distante de quelque 418 années-lumière, est trop lointaine pour que ses taches soient visibles directement. Par conséquent, les chercheurs se reportent sur la «courbe de luminosité» (la luminosité reçue en fonction du temps) et espèrent y mesurer les légères diminutions de luminosité dues à l'apparition des taches stellaires sur l'astre au fil de sa rotation.

L'analyse de la variation de la luminosité indique bien que l'étoile J1407 est une jeune étoile en rotation rapide. Cependant, les données enregistrées et archivées depuis quelques années livrent d'autres informations étonnantes. En 2007, cette étoile *a priori* quelconque s'est mise à clignoter irrégulièrement pendant de nombreuses nuits, avant de s'assombrir au point de devenir quasi invisible sur une semaine, et de finalement retrouver son éclat habituel. En revanche, les données récoltées sur d'autres périodes n'indiquent pas de telles évolutions de luminosité. L'événement isolé de 2007 n'a alors pas retenu l'attention, et les données sont restées inexploitées. Mais Eric Mamajek, après en avoir pris connaissance début 2011, n'a cessé d'y repenser.

«J'ai affiché dans mon bureau un tirage de la courbe de luminosité, et je l'ai regardée pendant des semaines», me raconta-t-il quelque temps plus tard dans ce bar de Tucson. «Cette structure et ces détails dingues étaient uniques. À quoi donc pouvaient être dus ces rapides changements de luminosité de l'étoile?» Peu après cette discussion, nous avons commencé à collaborer pour résoudre le mystère. Nous avons rapidement écarté les coupables les plus évidents, tels des dysfonctionnements de détecteurs ou de mauvaises conditions d'observation. Quelle qu'en soit sa nature, la source des mystérieuses baisses de luminosité de J1407 ne se trouvait pas sur Terre.

Une étoile qui clignote bizarrement

Nous savions pertinemment que des planètes sont également à l'origine de semblables diminutions de luminosité lorsqu'elles «transitent» devant leur étoile, vue depuis la Terre. Eric Mamajek et Mark Pecaut ont bien récupéré la courbe de luminosité de J1407 dans la base de données du relevé SuperWASP, qui a permis à ce jour de trouver 118 planètes en transit en surveillant environ 31 millions d'étoiles… Nous avons conclu que quelque chose de très rapide et volumineux devait éclipser J1407 et la faire clignoter. La rapidité des fluctuations de luminosité suggérait que l'objet «masquant» était passé devant le disque stellaire à une vitesse de 30 kilomètres par seconde, et néanmoins l'éclipse

avait persisté pendant 56 jours ! Cette durée signifiait que l'objet devait avoir une taille supérieure à 180 millions de kilomètres.

Seules quelques explications plausibles sont compatibles avec un objet d'une telle taille. Une par une, nous les avons envisagées, et nous les avons écartées. S'agirait-il d'une ceinture de poussières en orbite près de l'étoile ? Non, car aucun rayonnement infrarouge n'a été observé autour de J1407, un tel rayonnement étant révélateur de la présence de poussières chaudes. Devrions-nous imaginer un système binaire constitué d'une étoile de type géante rouge capable d'éclipser son plus petit compagnon (une naine blanche, une étoile à neutrons ou un trou noir) ? Non, car ces systèmes émettent beaucoup plus de rayons X, et J1407 ne semble pas être une étoile géante.

Ce clignotement serait-il dû à l'ombre créée fortuitement par un objet flottant dans l'espace interstellaire profond, entre la Terre et l'étoile ? J1407 serait-il un système complexe à trois étoiles dont l'un des compagnons, large de 180 millions de kilomètres, produirait des éclipses ? Aucune de ces possibilités ne correspondait davantage aux données. En fin de compte, l'explication compatible avec toutes les observations et qui restait la plus simple demeurait toutefois bien étrange : les chutes mesurées de la luminosité seraient le fait d'un système d'anneaux géant (quelque 200 fois plus étendu que celui de Saturne) en orbite autour d'une planète invisible qui serait passée devant son étoile J1407, en 2007.

Mais quels indices nous ont menés sur la piste d'un système d'anneaux ? Le niveau de détail visible à toutes les échelles temporelles était sans doute la caractéristique la plus frappante de la courbe de luminosité : l'éclipse globale durait 56 jours, mais des changements rapides se produisaient parfois en seulement vingt minutes. Ces derniers nous amenèrent à penser que l'objet masquant avait de nombreuses sous-structures. En outre, la forme quasi symétrique de la courbe de luminosité suggérait un objet de géométrie elliptique ou circulaire, à l'image du système d'anneaux de Saturne. Si notre approche est juste, ces immenses anneaux planétaires seraient les premiers à être découverts en dehors du Système solaire.

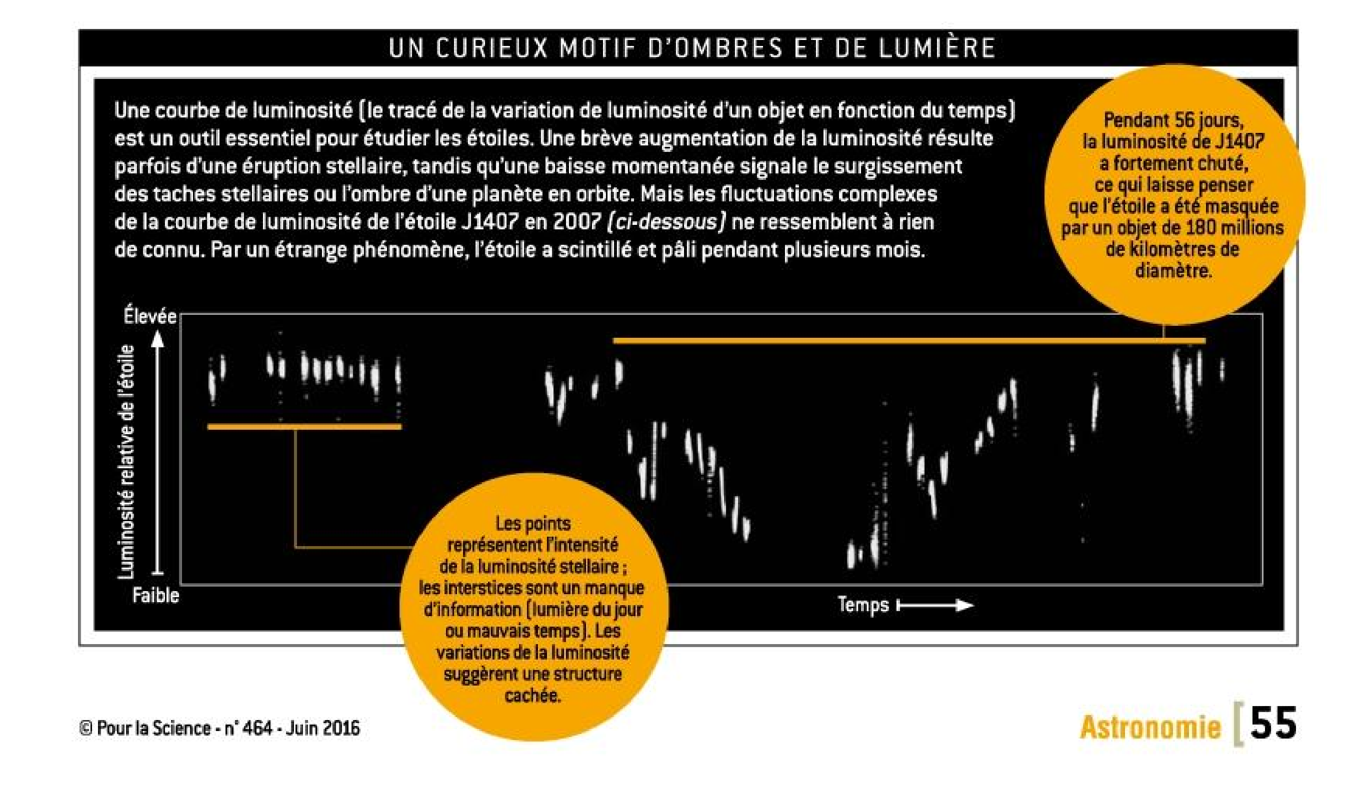
La chasse aux planètes

Si nous étions réellement face à un système d'anneaux géant, alors il devrait y avoir une planète également géante autour de J1407 qui maintiendrait ces anneaux en place. Nous nous sommes donc mis en quête de cette planète, que nous nommons J1407b, à l'aide de deux des plus imposants observatoires : le télescope de 10 mètres de diamètre Keck II, à Hawaii, et le télescope VLT de 8,2 mètres, au Chili.

Même les plus massives et les plus brillantes des planètes restent faiblement lumineuses et difficiles à distinguer aux abords de leur étoile hôte. Par chance, J1407 est une jeune étoile dont l'âge est estimé à seulement 16 millions d'années : toute planète gazeuse géante en orbite autour d'elle brillerait encore fortement dans l'infrarouge en raison de la chaleur de sa récente formation. Étant donné la distance qui nous sépare de J1407, une planète se déplaçant sur une orbite équivalente à Jupiter (la plus importante des planètes du Système solaire) serait séparée de l'étoile d'un angle de 50 millisecondes. Cette valeur est équivalente à la distance entre les poteaux de but d'un terrain de foot vus depuis la surface de la Lune. Bien que difficile, une telle observation est à notre portée.

Pendant deux ans, nous nous sommes attelés à obtenir une « image » de la planète tout en traquant les oscillations de l'étoile dues à la faible force d'attraction de cet objet invisible en orbite. Pour chaque révolution de la planète, l'étoile montrerait un balancement latéral infime. Nous avons également mis à contribution un réseau d'astronomes professionnels et amateurs afin d'effectuer un suivi de la luminosité de J1407 toutes les nuits, à la recherche d'une nouvelle atténuation qui signalerait le début d'une éclipse.

Hélas, nous n'avons rien trouvé. Ce résultat n'invalide pas pour autant l'existence de la planète ; même dix fois plus



Source : T.I.M. van Werkhoven, M. A. Kenworthy et E. E. Mamajek, MNRAS, vol. 441, n° 4, 11 juillet 2014

massive que Jupiter, J1407b aurait pu aisément nous échapper. Il est également possible que nous ayons regardé au mauvais moment, lorsque la planète restait cachée derrière son étoile. Cependant, ces non-détections nous ont au moins permis d'éliminer certains types de compagnons, telles des étoiles de faible masse dont nos instruments auraient révélé l'éclat.

Malgré les doutes, nous avons persisté, essayant de déduire l'architecture des anneaux dont nous supposions la présence autour de J1407b. De longs mois durant, notre équipe a développé des modèles informatiques pour extraire de l'information sur la constitution et la structure tridimensionnelle des anneaux à partir de la courbe de luminosité de J1407.

Face au tableau blanc et réfléchissant au problème avec plusieurs autres collègues, nous avons soudain eu une idée : même si nous ne connaissions pas le nombre exact et la localisation des anneaux, la pente des segments de la courbe de luminosité est susceptible de nous renseigner sur la géométrie globale du système d'anneaux, tel son alignement avec l'étoile centrale.

COMMENT CARTOGRAPHIER

Après avoir envisagé tout un éventail d'explications possibles, les astronomes ont conclu que le scintillement de l'étoile devait être dû à l'ombre saccadée d'un vaste système d'anneaux porté par une planète invisible en orbite autour de l'étoile. Pour le démontrer, ils ont créé un modèle numérique de ce système afin de tester les différentes configurations d'anneaux susceptibles d'induire une telle variation dans la courbe de luminosité.

Anneaux autour de J1407b
Étoile J1407
Planète J1407b
L'orbite de J1407b est vue pratiquement à plat depuis la Terre

Du point de vue de l'observateur, le passage d'une planète devant une étoile équivaut au passage d'une étoile derrière la planète ; par souci de simplicité, c'est cette seconde perspective qui a été adoptée ci-dessous.

Trajectoire de l'étoile derrière les anneaux

Trajectoire de l'étoile derrière les anneaux
Même anneau, même géométrie des bords
Luminosité de l'étoile
Temps

MODÈLE DE BASE

Tout système d'anneaux autour d'une planète forme un ensemble symétrique d'ellipses gigognes. Si cette planète transite devant son étoile et que son système d'anneaux est précisément aligné avec notre ligne de visée, la signature du transit dans la courbe de luminosité sera symétrique. Quand un anneau passe devant l'étoile, son bord d'attaque va projeter une ombre, suivie un peu plus tard d'une seconde ombre correspondant à son bord de fuite. Dans ce scénario idéal, la symétrie permet de compter facilement les anneaux et de cartographier leurs espacements.

Trajectoire de l'étoile derrière les anneaux
Étoile J1407
J1407b
Même anneau, mais géométrie des bords différente
Luminosité de l'étoile
Temps

SYSTÈME INCLINÉ

En réalité, la plupart des systèmes d'anneaux apparaîtront très probablement inclinés, ce qui produira une courbe de luminosité dissymétrique. Dans ces cas, l'inclinaison, le nombre et l'espacement des anneaux seront mesurés grâce aux propriétés des pentes de la courbe de luminosité.

Lacune entre les anneaux
Élevée
Luminosité relative de l'étoile
Faible
15 avril 2007

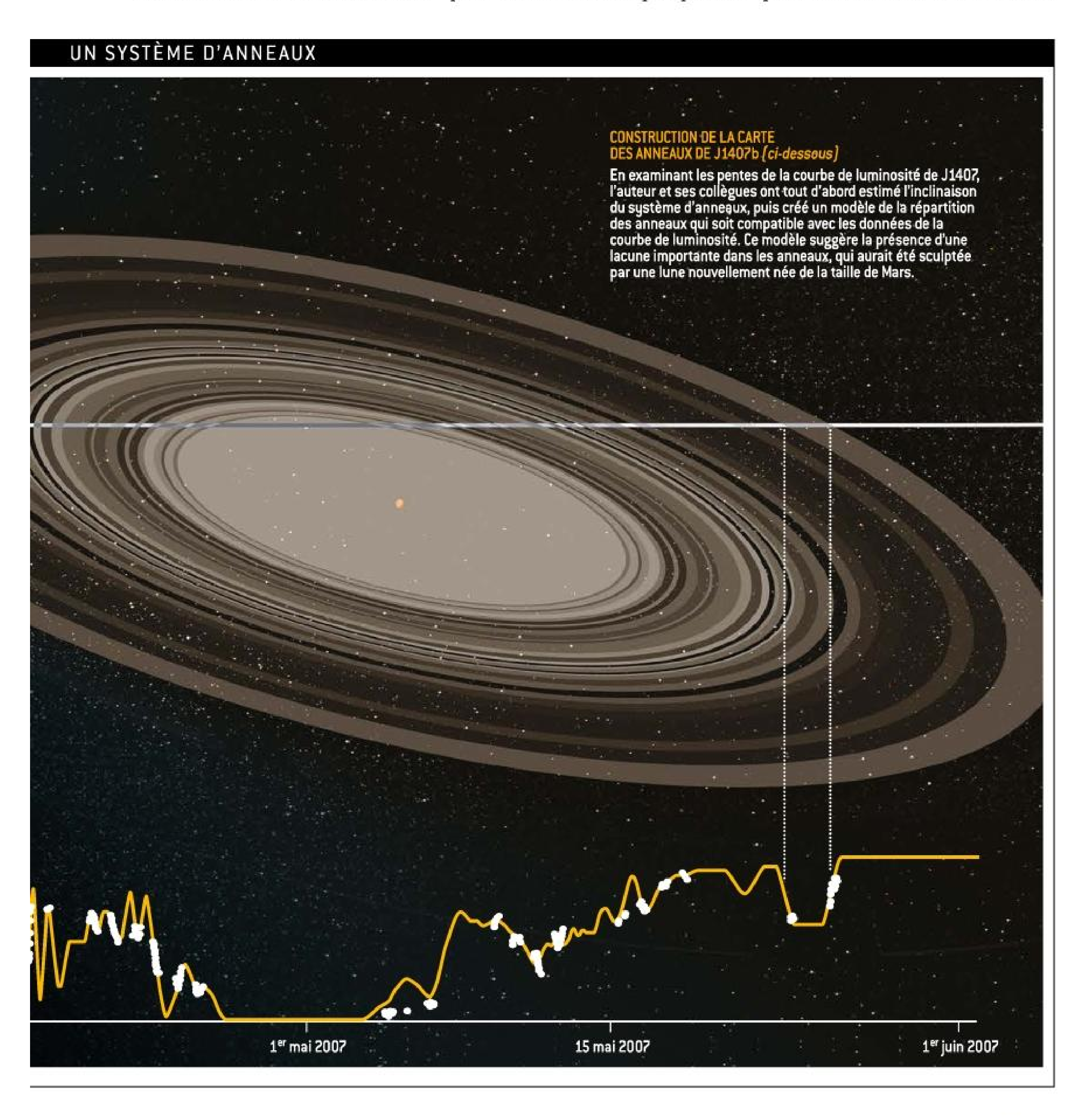
Nigel Hawtin (schémas) et Ron Miller (système d'anneaux de J1407b)

Grâce à cette idée, nous étions désormais en mesure de compléter notre modèle informatique qui décrit les anneaux et de produire des courbes types fondées sur des hypothèses d'orientation et d'inclinaison des anneaux. Comme nous l'espérions, l'une des configurations testées correspondait exactement aux motifs observés dans les données de luminosité de J1407 !

Armés de ce nouvel élément, nous avons déterminé la structure du système, reliant chaque partie de la courbe de luminosité à différents anneaux distribués autour de la planète J1407b. Chaque rupture de la pente de la courbe de luminosité marque le début ou la fin du transit d'un anneau devant l'étoile. Ainsi, le décompte de ces points d'inflexion nous indique la présence d'au moins vingt-quatre anneaux. Si l'on prend en compte le manque de données inhérent aux occasionnelles mauvaises conditions d'observation nocturne, nous estimons que le système comporte probablement une centaine d'anneaux.

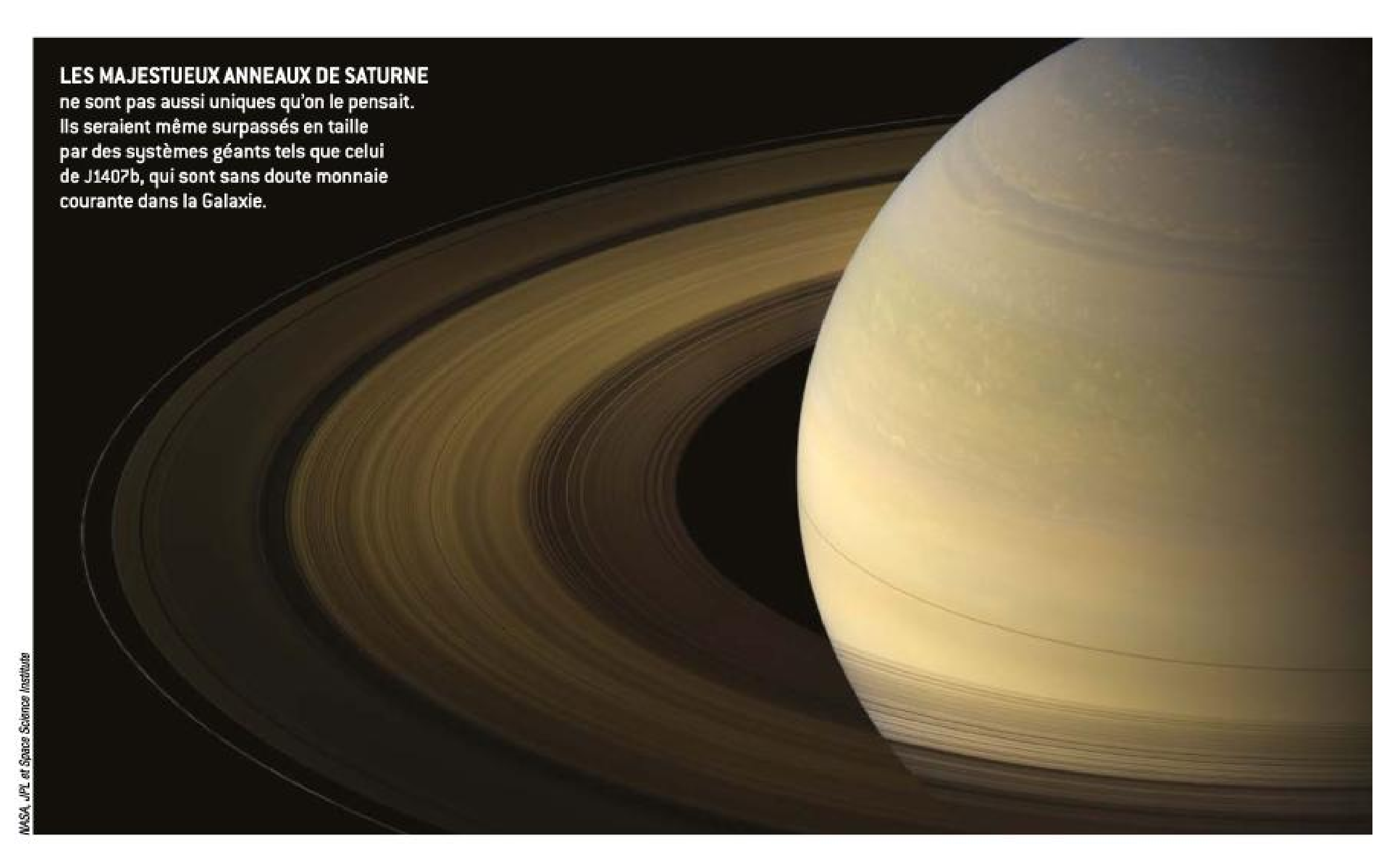
Nous avons le privilège de saisir le système d'anneaux de J1407b à un stade particulier de son évolution. En effet,

UN SYSTÈME D'ANNEAUX



CONSTRUCTION DE LA CARTE DES ANNEAUX DE J1407b *(ci-dessous)*

En examinant les pentes de la courbe de luminosité de J1407, l'auteur et ses collègues ont tout d'abord estimé l'inclinaison du système d'anneaux, puis créé un modèle de la répartition des anneaux qui soit compatible avec les données de la courbe de luminosité. Ce modèle suggère la présence d'une lacune importante dans les anneaux, qui aurait été sculptée par une lune nouvellement née de la taille de Mars.



LES MAJESTUEUX ANNEAUX DE SATURNE ne sont pas aussi uniques qu'on le pensait. Ils seraient même surpassés en taille par des systèmes géants tels que celui de J1407b, qui sont sans doute monnaie courante dans la Galaxie.

NASA, JPL et Space Science Institute

considérons un instant le système d'anneaux de Saturne et sa transformation au fil du temps. L'apparence monobloc de ses anneaux est en fait une illusion. Ces derniers sont constitués de particules de glace qui tracent des orbites circulaires autour de la planète. Les anneaux, formés d'agrégats de particules, sont malmenés par de minuscules lunes (des lunes mineures) qui sont en orbite en leur sein et jusqu'au-delà de leur bord externe. Il est admis que Saturne était autrefois doté d'anneaux plus larges, mais que les petites particules situées en périphérie du système se sont regroupées sous l'effet de leur attraction mutuelle. Ce processus, de plus en plus efficace à mesure que les masses se sont concentrées, a formé certaines des lunes de Saturne qui nous sont familières. Ce spectacle, aussi beau qu'éphémère, n'est plus de notre temps et il aurait fallu une bonne dose de chance pour l'observer ailleurs, en « direct ».

Comme le système d'anneaux de Saturne il y a longtemps, celui de J1407b semble aujourd'hui en transition. Notre modèle suggère que le système présente une large brèche, probablement formée par ce que les astronomes n'ont jamais vu auparavant : une lune (une exolune nouvellement née) en orbite autour de J1407b. D'après nos calculs, ce satellite ferait le tour de J1407b en presque deux années et aurait la masse de Mars. À lui seul, l'espacement dans les anneaux ne peut constituer une détection catégorique d'exolune. Mais si la réalité de J1407b et de son système d'anneaux se confirme, ce sera la meilleure indication disponible pour dévoiler l'existence de ces objets que les astronomes recherchent depuis longtemps.

Sur la piste d'une exolune de la taille de Mars

Ce système exotique nous offre un panorama spectaculaire. En arrivant de l'espace interstellaire, vous seriez ébloui par la luminosité de l'étoile primaire dominant allègrement l'éclat terne, mais rougeoyant, de sa planète. À l'approche de cette dernière, les anneaux se dévoileraient par de brillantes rayures sur le fond sombre de l'espace. Ceinturé de débris variés produits par les collisions, le plan des anneaux serait envahi par des agrégats de matière. Le plus gros d'entre eux, à savoir une lune de la taille de Mars, aura balayé un espace important dans le système et créé une grande lacune. Si cette lune est dotée d'une atmosphère, les particules égarées issues des anneaux brûleraient sous l'effet des frottements lors de leur traversée, en emplissant le ciel d'une pluie de météores scintillants.

J1407b représente pour les astronomes bien plus que la possibilité d'imaginer des paysages saisissants. Les planètes gazeuses géantes en orbite rapprochée autour de leur étoile sont parmi les compagnons les plus faciles à détecter. Sans surface solide, elles offrent des perspectives médiocres pour la vie telle que nous la connaissons. Mais une lune imposante qui graviterait autour de celle-ci serait bien différente, car elle offrirait une surface rocheuse porteuse d'eau relativement hospitalière pour la vie. Si le Système solaire est une référence, notre galaxie abriterait des milliers de milliards de grosses lunes en orbite autour de planètes géantes. Prouver l'existence de lunes autour de géantes gazeuses extrasolaires élargirait le champ des possibles pour les lieux d'apparition de la vie.

Depuis quelques années, un petit noyau de chercheurs traque sans relâche les exolunes, principalement par l'intermédiaire des effets indirects qu'elles

induisent sur le mouvement de leurs hôtes. Les planètes en transit atténuent de manière précise et périodique la luminosité de leur étoile mère, mais la masse d'une importante et invisible exolune entraîne un décalage supplémentaire dans le déroulement par ailleurs régulier des éclipses. Des astronomes tels que David Kipping, de l'université Columbia, ont mené des études poussées pour mettre au jour ces signatures d'exolunes dans les courbes de lumière de planètes à transit découvertes par le satellite *Kepler* de la Nasa. À ce jour, ils n'en ont trouvé aucune. Mais la lune possible de J1407b nous amène à penser que ces recherches porteront bientôt leurs fruits.

Cependant, la planète comme sa lune restent hypothétiques. Les plus grands télescopes et les instruments les plus sensibles sur Terre ne sont pas encore parvenus à trouver des preuves irréfutables de leur existence. En revanche, des données plus anciennes et archivées, recueillies grâce à des technologies aujourd'hui rudimentaires, seraient en mesure de nous apporter ces preuves…

Retour vers le futur

Le centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian, à Cambridge aux États-Unis, accueille de nombreux chercheurs qui récupèrent les données des télescopes spatiaux, écrivent des articles, exécutent des simulations et assistent à des séminaires. À quelques mètres de ce bâtiment plein d'animation, hébergés dans une annexe aux murs de briques où peu de monde s'aventure, se trouvent les Harvard Plate Stacks et ses piles de grosses enveloppes en papier posées sur de longues étagères couvrant les murs jusqu'au plafond sur trois étages. Il ne s'agit pas d'un magasin de revente de disques en vinyle : ces écrins contiennent en réalité plus de un million de plaques photographiques provenant de divers observatoires, soit un quart de la collection mondiale. Cela représente un siècle d'observations du ciel nocturne.

Ces clichés historiques sont maintenant passés en revue par le projet *Digital Access to a Sky Century @ Harvard*, qui a pour objectif de numériser et de mettre en ligne toutes les données stockées sur ces fragiles plaques de verre. Nous avons déterminé que J1407 apparaît sur environ 700 de ces plaques, des images prises entre 1901 et 1984. Avec ces données complémentaires, nous espérons dévoiler d'autres éclipses et déterminer ainsi leur fréquence. Pour l'heure, notre meilleure estimation est que la prochaine éclipse de J1407 se produira au cours de la décennie à venir.

La course est engagée pour trouver de nouveaux systèmes d'anneaux géants et d'exolunes semblables à celui dont on soupçonne la présence autour de J1407b

Nous sommes ainsi toujours à la recherche d'une preuve définitive de l'existence de la planète et de ses anneaux. Des astronomes enthousiastes surveillent J1407 presque toutes les nuits et cherchent à observer la baisse de luminosité attendue quand les anneaux les plus externes commencent à passer devant l'étoile. Lorsque cela se produira, de nombreuses observations seront menées pour étudier les anneaux beaucoup plus en détail. Nous utiliserons les spectrographes des plus grands télescopes afin de collecter une partie de la lumière stellaire filtrant à travers et autour des anneaux (ce qui révélera leur composition chimique et la façon dont elle varie avec la distance à J1407b). Et pour ne rien gâcher, J1407 est une étoile relativement brillante visible depuis l'hémisphère Sud, facile à observer : des astronomes du monde entier munis de petits télescopes seront en mesure d'enregistrer les fluctuations de luminosité de l'étoile en temps réel et d'offrir une surveillance en continu, 24 heures sur 24.

Notre plongée dans les anneaux géants de J1407b n'est que le début d'une longue série d'études concernant les mécanismes de formation des systèmes stellaires. Il est admis que les planètes géantes nouvellement nées sont flanquées de disques circumplanétaires tumultueux qui se condensent en anneaux et en lunes. Nous espérons bientôt détecter d'autres systèmes de ce type grâce aux ombres qu'elles projettent au loin et sur nous, à travers la Galaxie. Maintenant que nous savons ce que nous cherchons, la course est engagée pour trouver de nouveaux systèmes d'anneaux géants et d'exolunes semblables à celui dont nous soupçonnons la présence autour de J1407b. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. A. Kenworthy et E. E. Mamajek, **Modeling giant extrasolar ring systems in eclipse and the case of J1407b : Sculpting by exomoons ?**, *Astrophysical journal*, vol. 800(2), article n° 126, 2015.

E. E. Mamajek *et al.*, **Planetary construction zones in occultation : Discovery of an extrasolar ring system transiting a young Sun-like star and future prospects for detecting eclipses by circumsecondary and circumplanetary disks**, *Astronomical Journal*, vol. 143(3), article n° 72, 2012.

Entretien avec J.-Ph. Beaulieu, **Petites, sombres, lointaines : comment les détecter ?**, *Dossier Pour la Science*, n° 64, 2009.

SUR LE WEB

Portail pédagogique du Labex ESEP sur les systèmes planétaires et les exoplanètes : www.esep.pro/Sciences-pour-les-Exoplanetes-et.html



UNE NOUVELLE ESPÈCE HUMAINE, *Homo naledi,* soulève de nombreuses questions sur l'origine et l'évolution des australopithèques et du genre humain.



Kate Wong

Petite, le cerveau gros comme une orange, à la fois primitive et proche de nous, une espèce humaine mise au jour en 2013 fait parler d'elle et agite le milieu des paléoanthropologues.

Un murmure d'approbations s'élève dans la cave. Lee Berger vient d'ouvrir la caisse n° 2, qui contient les ossements fossiles qui définissent *Homo naledi*. Cinq autres de ces caisses, initialement destinées à accueillir des fusils d'assaut, sont pleines d'autres fossiles enchâssés dans de la mousse. Religieusement, Lee Berger sort un maxillaire et une mandibule… D'un geste étudié, il les positionne l'un au-dessus de l'autre avant de nous présenter l'ensemble en souriant. Les flashs crépitent. Les stylos courent… La douzaine de journalistes présents sont sous le charme. Plus tard, Lee Berger passera d'un spécimen à l'autre, répondant volontiers à toute question, prenant la pose dans son blazer de cuir… Finalement, il nous invitera à réaliser des selfies avec l'autre célébrité présente, à l'origine de notre présence dans la cave à fossiles de l'université du Witwatersrand: *Homo naledi*.

Comme il y a cinq ans pour *Australopithecus sediba*, Lee Berger a organisé pour *H. naledi* un grand spectacle médiatique. Le verbe haut, le sens de la mise en scène et plus généralement le style de cet Indiana Jones sont en train d'en faire le paléoanthropologue le plus connu du monde… et le plus décrié parmi ses pairs. Sa dernière découverte, faite à partir de 2013, est pourtant vraiment spectaculaire: alors que, le plus souvent, les nouvelles espèces humaines sont décrites à partir d'une ou de deux pièces fossiles, Lee Berger a exhibé 1 550 fossiles d'*H. naledi*; et, chose sidérante pour le connaisseur, les caractères que l'on y lit font tantôt penser à un australopithèque, tantôt à un humain ou alors… n'avaient jamais été observés auparavant.

Déjà dans le cas d'*Au. sediba*, plutôt qu'un fossile isolé, Lee Berger avait présenté deux squelettes assez complets. Aussitôt, il avait voulu y voir des ancêtres du genre humain. Pour *H. naledi*, il affirme quelque chose d'encore plus énorme: il soutient que cette forme au cerveau de la taille d'une orange était humaine et qu'elle pratiquait des rituels funéraires! Tout cela s'agissant d'une forme fossile peut-être très ancienne, mais aussi peut-être récente, puisqu'elle n'a pas encore été datée…

Pour comprendre comment Lee Berger en vient à de telles affirmations, le mieux

L'ESSENTIEL

- **Des spéléologues ont découvert en 2013 une salle pleine de fossiles dans la grotte Rising Star, non loin de Johannesburg, en Afrique du Sud.**
- **En deux expéditions, l'équipe de Lee Berger a extrait 1 550 fossiles correspondant à plus de 15 individus.**
- **Ils appartiennent à une nouvelle espèce humaine semble-t-il très ancienne, même si elle n'a pas encore été datée.**
- **La présentation en fanfare de cette découverte majeure a suscité un malaise dans la communauté des paléoanthropologues.**



L'ENTRÉE DE RISING STAR, la grotte où une chambre remplie de fossiles d'une nouvelle espèce humaine a été découverte, se trouve dans le « Berceau de l'humanité » sud-africain, une région située à 50 kilomètres au nord-ouest de Johannesburg où les grottes à fossiles abondent.



est de raconter l'histoire si particulière de la découverte d'*H. naledi*. Lee Berger emploie des chasseurs de fossiles, qui écument pour lui les grottes du « Berceau de l'humanité » sud africain. Située à quelque 50 kilomètres au nord-ouest de Johannesburg, cette région calcaire truffée de grottes est surnommée ainsi parce qu'elle regorge de fossiles d'hominines – terme employé par les paléoanthropologues pour désigner les hominidés ayant adopté une bipédie permanente. En pratique, il y a deux sortes d'hominines : les australopithécines, qui sont des bipèdes permanents encore très capables de grimper aux arbres, et les humains, qui sont des bipèdes permanents non arboricoles.

Le 1er octobre 2013, Lee Berger reçoit un appel de Pedro Boshoff, l'un des spéléologues qu'il a engagés pour explorer les cavités du Berceau de l'humanité, en dépit du fait que cette région passe pour avoir été ratissée dans tous les sens par les mineurs dans le passé et aujourd'hui par les chasseurs de fossiles…

Pedro Boshoff fait part à Lee Berger de la découverte par son équipe d'une chambre pleine d'ossements, mais extrêmement difficile d'accès, dans la grotte Rising Star. La cavité en question est bien connue de Lee Berger, puisqu'elle se trouve à seulement un kilomètre du lieu de la découverte d'*Au. sediba*. Disciplinés, les explorateurs n'ont pas touché aux os ; ils n'en rapportent que de mauvaises images. Dès qu'il les aperçoit, Lee Berger devine qu'une grande découverte est imminente : les ossements qu'il voit diffèrent nettement de ceux d'*Homo sapiens* ; il voit aussi que les ossements sont nombreux, ce qui laisse espérer la reconstitution d'un squelette. Fidèle à son tempérament, il commence aussitôt à organiser des fouilles.

Très vite, il devient clair que ni lui ni la plupart des paléoanthropologues ne pourront accéder à Dinaledi, la chambre aux fossiles. Pour y parvenir, il faut franchir deux passages de 20 à 25 centimètres de large ou de haut. Les élargir perturberait beaucoup la grotte et pourrait conduire à un endommagement des fossiles… Lee Berger décide donc de rechercher des fouilleurs ayant déjà travaillé sur des sites à hominines, ayant une expérience spéléologique et assez minces pour franchir les boyaux menant à Dinaledi.

Des fouilles réalisées par des femmes minces

Résultat du tri : seules quelques femmes rassemblent le bon mélange de compétences scientifiques et de… minceur. En plus de ces fouilleuses, Lee Berger rassemble une équipe scientifique comportant toutes les spécialités nécessaires. Il parvient à accomplir tout cela en cinq semaines, alors qu'il n'offre guère plus qu'un billet d'avion pour l'Afrique du Sud et la promesse d'une belle aventure paléontologique… Un circuit vidéo est installé, qui permettra aux paléoanthropologues expérimentés de son équipe de diriger et de contrôler l'application du strict protocole mis au point pour fouiller la chambre dans des conditions optimales.

Dans le même temps, il organise une intense campagne médiatique en collaboration avec le magazine *National Geographic*, qui lui fournit une partie de ses moyens financiers. Sont notamment prévus une avalanche de *tweets*, de billets de blog, d'entretiens radiophoniques, de clips vidéo réalisés dans la grotte, et un documentaire de 56 minutes… Rien de l'aventure ne doit échapper au public. Le show commence le 10 novembre 2013. Devant les caméras, les fouilleuses rampent pour la première fois jusqu'à la chambre, où elles commencent à préparer le prélèvement des os.

Marina Elliott fut la première scientifique à pénétrer dans la chambre. Pour que je me rende compte de l'étroitesse du *Superman's crawl* – le boyau menant à Dinaledi –, elle m'a montré son entrée. Pour le traverser, les membres de l'équipe des fouilles devaient parvenir à ramper un bras tendu vers l'avant et l'autre collé au corps, donc dans une position rappelant à tous les anglophones celle de Superman (*Superman's crawl* signifie le « rampement de Superman ») ; elles se retrouvaient dans une première chambre, puis devaient escalader le *Dragon's back* (le « dos du dragon »), une arête rocheuse ; une fois en haut, il ne leur restait qu'à descendre le long d'un étroit boyau quasi vertical de 12 mètres menant à Dinaledi.

Ce parcours spéléologiquement éprouvant en valait la peine : en trois semaines seulement, Marina Elliott et ses coéquipières sont parvenues à sortir de la grotte pas moins de 1 200 pièces. En mars 2014, une deuxième campagne de fouille produisit quelques centaines de pièces de plus, de sorte qu'au total l'équipe a mis au jour plus de 1 550 ossements fossiles. Ces os et fragments osseux proviennent d'au moins 15 individus, comprenant de jeunes enfants,

des adolescents, de jeunes adultes et des vieillards. L'assemblage fossile produit est le plus grand jamais rassemblé pour une espèce hominine ancienne, et Dinaledi recèle encore probablement des milliers d'os.

Une fois ses coffres pleins de fossiles, l'équipe de Lee Berger s'est attelée à la difficile tâche de les caractériser. Dès l'apparition des fossiles à la lumière du jour, leur étrange mélange de caractères modernes et archaïques a déconcerté les chercheurs. Tout aussi étonnant est le fait que ces vestiges d'hominines ne sont accompagnés d'aucun ossement d'antilope, de hyène ou de singe, contrairement à ce que l'on constate d'ordinaire dans des grottes souterraines.

■ L'AUTEURE



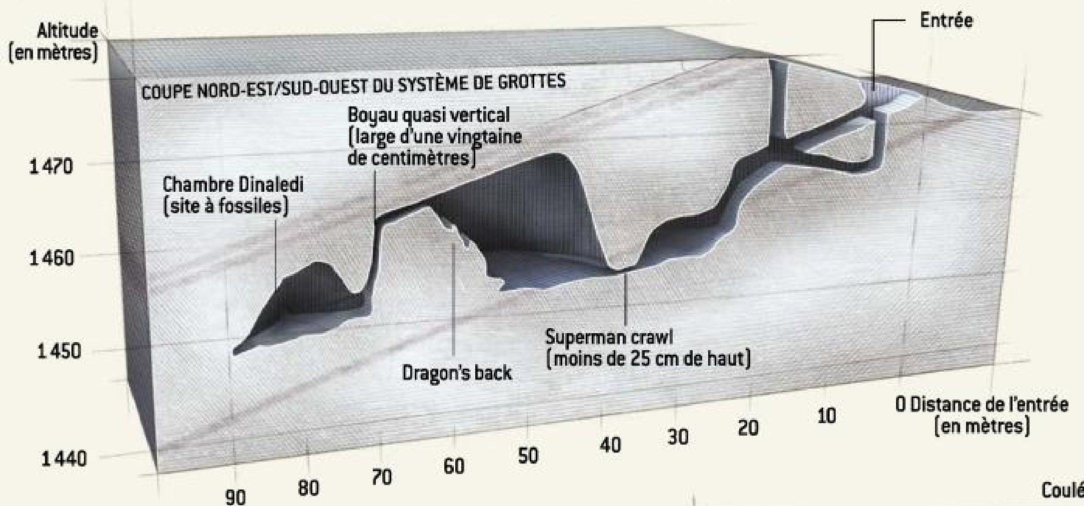
Kate WONG est éditrice et chef de rubrique au magazine *Scientific American*.

Pendant tout le mois de mai 2014, une équipe de 35 jeunes chercheurs a intensément travaillé à la caractérisation de la nouvelle espèce. Pour ces doctorants et postdoctorants, l'occasion de travailler sur du matériel inédit était précieuse, puisque généralement les jeunes paléoanthropologues font leurs armes sur du matériel déjà décrit par d'autres chercheurs plus expérimentés. Ils étaient organisés en cinq groupes d'étude respectivement chargés du squelette crânien, des dents, des mains, de la colonne vertébrale et des membres inférieurs (hanches, jambes, pieds).

Au bout d'un mois de travail, les cinq équipes ont pu mettre en commun leurs

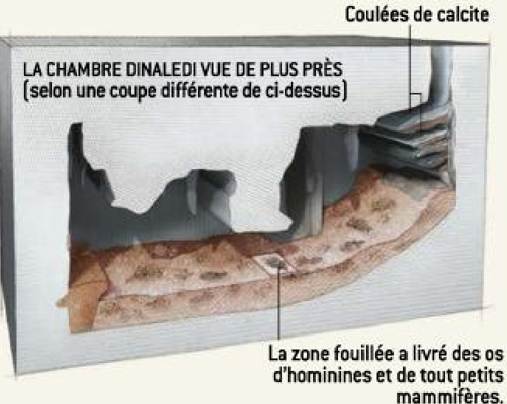
UN OSSUAIRE TRÈS DIFFICILE À ATTEINDRE

Les ossements de l'espèce *Homo naledi* ont été découverts par des spéléologues à Dinaledi, l'une des chambres de la grotte Rising Star, située non loin de Johannesburg. Cette chambre se trouve à une trentaine de mètres sous la surface. S'y rendre est difficile. Ainsi, les chercheuses qui ont prélevé les fossiles ont été choisies non seulement pour leur compétence scientifique, mais aussi pour leur minceur, car pour atteindre Dinaledi, elles devaient traverser deux passages étroits : le *Superman crawl* et le boyau quasi vertical. On ignore comment les ossements fossilisés dans Dinaledi y sont parvenus. Le paléoanthropologue Lee Berger soutient que les corps ont été transportés intentionnellement dans la chambre, ce qui semble étonnant aux membres de son équipe qui s'y sont rendus... Pour autant, ils ne sont pas parvenus à proposer une autre explication plausible.



D'ÉTRANGES CIRCONSTANCES

L'absence apparente de restes de grands animaux dans la chambre est l'une des raisons pour lesquelles les chercheurs supposent que les corps y ont été déposés intentionnellement, traduisant peut-être une pratique funéraire, plutôt que par une inondation ou une accumulation due à des fauves. Si des fossiles de gros animaux avaient été présents, l'examen des espèces représentées aurait pu donner une indication sur la date de dépôt des corps. De même, l'âge de la calcite déposée sur les fossiles ou à proximité aurait pu aider à déterminer celui des fossiles, mais ce minéral est contaminé par de l'argile, ce qui fausse la datation de cette roche. Il va falloir attendre que les géologues, d'une façon ou d'une autre, résolvent l'énigme que représente l'âge des ossements de Dinaledi.



Illustrations de José Miguel Mayo, d'après Paul H.G.M. Dirks et al., eLife, article 09561, publié en ligne le 10 septembre 2015





observations. Une vision étonnante s'est alors formée : celle d'un hominidé grand et mince, doté de membres supérieurs construits pour grimper aux arbres mais aussi capables de manier des outils, le tout commandé par un tout petit cerveau… Il ne s'agit là que de quelques-uns des traits d'*H. naledi*, mais ils suffisent à montrer le caractère étonnant, voire stupéfiant pour les paléoanthropologues, de cette forme hominine.

Cette singularité m'est apparue de façon encore plus nette le jour où l'un des membres de l'équipe de Lee Berger – le paléoanthropologue John Hawks, de l'université du Wisconsin – me l'a détaillée dans la cave à fossiles, me montrant à quel point *H. naledi* mélange des traits connus chez diverses autres espèces d'hominidés. Le volume de son cerveau était compris entre 450 et 550 centimètres cubes, ce qui le rend comparable à celui de Lucy, l'australopithèque des Afars d'il y a quelque 3,2 millions d'années, découverte en Éthiopie en 1974.

Pour autant, la forme générale du crâne évoque plutôt le crâne d'*Homo erectus*, assez proche de celui de l'humain moderne *(voir le cliché* d *ci-dessus)*. Les dents ressemblent en revanche à celles d'*Homo habilis* (l'une des plus anciennes formes humaines, sinon la plus ancienne), car leurs tailles augmentent depuis l'avant de la mâchoire vers l'arrière *(ci-dessus,* c*)*. Elles sont toutefois petites dans l'ensemble et les molaires ont des cuspides simples, ce qui évoque plutôt des formes humaines postérieures à *H. habilis*.

Les os postcrâniens, c'est-à-dire tous les os sauf le crâne, présentent aussi un mélange de traits connus chez d'autres formes hominines. Le bras combine une épaule et des doigts adaptés pour grimper aux arbres avec un poignet et une paume adaptés à la manipulation d'outils *(voir* a *ci-dessus et le cliché page 68)*, activité que l'on associe habituellement aux hominines non arboricoles à gros cerveaux inventifs. Quant aux jambes, elles combinent une articulation de la hanche semblable à celle de Lucy à un pied qu'il est pratiquement impossible de distinguer de celui de l'homme moderne *(voir l'encadré page 66)*.

Jusqu'à présent, les paléoanthropologues ont toujours considéré que les traits caractéristiques du genre *Homo* – tels le gros cerveau, la main habile fabriquant des outils ou encore les dents petites – ont évolué simultanément. *Au. sediba* et *H. naledi* montrent que ce n'est pas le cas, affirme John Hawks.

Un mélange étonnant de traits humains et australopithèques

Cette combinaison sans précédent de caractères archaïques et modernes n'est pas la seule originalité de *H. naledi* : il arbore aussi des traits inédits au sein du genre *Homo*. Il en est ainsi de ce premier métacarpien (celui du pouce) que John Hawks extrait pour moi de son logement en mousse avant de me le présenter à côté de son équivalent *sapiens (voir l'encadré page 66)*. La différence est nette ! Tandis que le fût du métacarpien d'*H. sapiens* est régulier, épais et large sur toute sa longueur, celui d'*H. naledi* est étroit à la base et large au sommet. Il comporte en outre une crête effilée sur toute sa longueur et des ailerons d'os sur les côtés. Le fémur ainsi que d'autres os portent également des traits uniques.

Pour l'équipe de Lee Berger, cette combinaison inédite de caractéristiques australopithèques et humaines et la présence de traits propres à *H. naledi* justifie l'attribution des fossiles de Rising Star à une nouvelle espèce hominine. Même s'ils n'ont pu à ce stade l'établir par des méthodes géologiques, ils proposent, dans leur article paru dans la revue en ligne et en libre accès *eLife*, qu'*H. naledi* date de plus de 2 millions d'années, ce qui le rattacherait aux débuts du genre *Homo*.

Si cette ancienneté se confirme, la découverte de *H. naledi* jouera un rôle crucial dans la résolution de la plus grande énigme de l'évolution humaine : celle de l'hominisation, c'est-à-dire du passage des australopithécines dotés de nombreux traits simiesques, aux humains et leur conformation moderne. La résolution de cette énigme est retardée par le fait que les fossiles datant de la période de transition sont excessivement rares et se limitent pour la plupart à des fragments isolés. Les paléoanthropologues sont impatients de savoir quelles espèces de la famille des hominines ont fondé le rameau humain et comment les traits du plan de l'organisme humain moderne sont apparus.

Non contente de présenter une espèce nouvelle qu'elle déclare humaine, l'équipe de Lee Berger soutient en outre que sa découverte implique qu'il faut changer de paradigme en paléoanthropologie. Selon ces chercheurs, le cas d'*H. naledi* (et dans





DU PIED À LA TÊTE. L'assemblage des fossiles de Rising Star comprend notamment des os du pied *(a)*, ce qui est rarissime pour des hominidés. De nombreux fragments de fémurs *(b)* renseignent les paléoanthropologues sur la bipédie d'*H. naledi*. La mâchoire inférieure *(c)* et les os crâniens *(d)* sont des vestiges bien plus fréquents chez les hominidés. Bien que fragmentaires, les fossiles de Rising Star sont bien conservés et peuvent dans certains cas être attribués au même individu, ce qui est par exemple le cas pour la mâchoire inférieure et les os crâniens ci-dessus. Ainsi, un squelette assez complet d'*H. naledi* a pu être reconstruit et utilisé pour décrire l'espèce, ce qui n'a pas été le cas pour d'autres espèces d'hominidés.

une moindre mesure celui d'*Au. sediba*) montre que des fragments fossiles isolés ne peuvent plus, désormais, suffire pour établir les relations de parenté des formes humaines : la « partie ne peut plus prédire le tout ». Une critique qui s'adresse directement à leurs collègues, dont une grande part de l'activité consiste à interpréter des fragments isolés, notamment ceux représentant les plus anciennes formes humaines.

Une pratique funéraire ?

Plus provocante encore est l'explication que l'équipe de Lee Berger a fini par donner à l'ossuaire de Dinaledi. Tout naturellement, elle a essayé d'expliquer comment autant d'ossements de la même espèce ont pu se retrouver dans la chambre. Les chercheurs ont envisagé plusieurs possibilités, les plus probables étant que les ossements auraient été charriés par l'eau souterraine ou qu'ils auraient été apportés par des fauves. Ces derniers, toutefois, auraient forcément laissé dessus des marques de dents, qui sont absentes, tandis qu'il semble par ailleurs impossible qu'une inondation souterraine n'ait accumulé dans la chambre que des os humains… Tout bien considéré, les chercheurs ont conclu que seuls des membres de la population d'*H. naledi* ont pu déposer les corps dans Dinaledi.

On imagine dans ce cas les difficultés qu'ils ont dû affronter pour traîner ces corps dans la grotte ! Certes, les géologues de l'équipe de Lee Berger ignorent comment le réseau souterrain de Rising Star s'est formé et a évolué. Pour le moment, ils n'ont pu déceler qu'une seule entrée débouchant dans la chambre aux fossiles. Si cette entrée est la seule depuis toujours, alors ceux qui ont amené les défunts ont dû à tout le moins escalader la crête de 20 mètres de haut du *Dragon's back* afin d'atteindre le boyau quasi vertical et, éventuellement, d'y pousser un corps. Et si, comme le pensent les chercheurs, l'accès à la chambre était plongé dans l'obscurité la plus totale, alors ils avaient besoin d'une source de lumière. D'après ce raisonnement, donc, non seulement *H. naledi* pratiquait des rites funéraires, mais il avait aussi la maîtrise du feu.

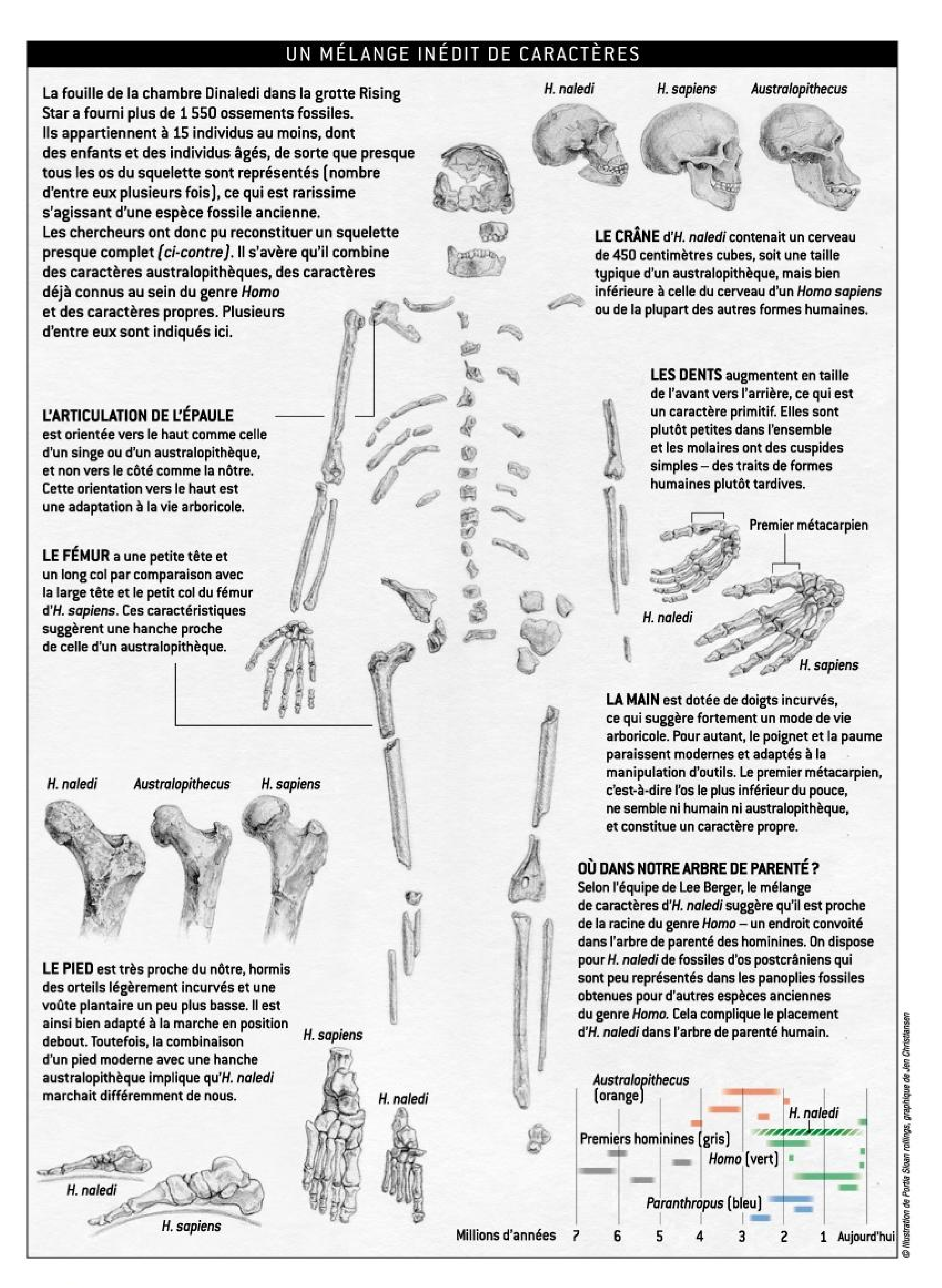
Dans son antre universitaire ressemblant davantage à l'intérieur d'un pavillon de chasse qu'à un bureau, Lee Berger, un *mug* de café à la main, discute de ce que signifie la découverte de Rising Star pour la paléoanthropologie. Quel que soit son âge, *H. naledi* va bouleverser notre vision de l'évolution humaine, assène-t-il. Si cet âge est grand, alors nous saurons que les traits d'*H. naledi* sont apparus au tout début du genre *Homo* ; s'il est très grand, *H. naledi* pourrait même faire sortir les australopithécines de notre lignée, estime-t-il. Si, en revanche, cet âge est modeste, il nous faudra reconsidérer à quelles espèces sont associées les cultures matérielles trouvées dans les sites majeurs de toute l'Afrique.

Il se pourrait aussi qu'*H. naledi* soit apparu il y a plusieurs millions d'années, qu'il soit resté longtemps inchangé et qu'il ait coexisté un temps avec les autres espèces humaines, dont la nôtre. Selon cette thèse, *H. naledi* a peut-être inventé certaines des traditions culturelles que les archéologues attribuent à notre espèce, voire se serait hybridé avec nos ancêtres, lui apportant une partie de son ADN, comme l'ont fait les Néandertaliens et les Denisoviens.

Malaise parmi les paléoanthropologues

Lorsque, en septembre 2015, l'équipe de Lee Berger a publié les articles annonçant sa découverte, le monde s'est déchaîné. Si le grand public a tout de suite montré de l'engouement, nombre de paléoanthropologues étaient mal à l'aise. Nul ne conteste l'importance de la trouvaille – une cavité remplie à ce point de tels fossiles est une découverte majeure –, mais la façon dont l'équipe de Lee Berger s'y prend pour prélever, décrire et interpréter les ossements suscite des froncements de sourcils.

La personnalité de Lee Berger n'est pas étrangère aux regards suspicieux de ses pairs universitaires. Télégénique, la voix forte, il s'est associé dès le début de sa carrière au magazine *National Geographic*. Ce partenariat lui a toujours valu des fonds de recherche, des manchettes de journaux et des apparitions à la télévision. Pourtant,


UN MÉLANGE INÉDIT DE CARACTÈRES
La fouille de la chambre Dinaledi dans la grotte Rising Star a fourni plus de 1 550 ossements fossiles. Ils appartiennent à 15 individus au moins, dont des enfants et des individus âgés, de sorte que presque tous les os du squelette sont représentés (nombre d'entre eux plusieurs fois), ce qui est rarissime s'agissant d'une espèce fossile ancienne.
Les chercheurs ont donc pu reconstituer un squelette presque complet (ci-contre). Il s'avère qu'il combine des caractères australopithèques, des caractères déjà connus au sein du genre Homo et des caractères propres. Plusieurs d'entre eux sont indiqués ici.
H. naledi
H. sapiens
Australopithecus
LE CRÂNE d'H. naledi contenait un cerveau de 450 centimètres cubes, soit une taille typique d'un australopithèque, mais bien inférieure à celle du cerveau d'un Homo sapiens ou de la plupart des autres formes humaines.
L'ARTICULATION DE L'ÉPAULE est orientée vers le haut comme celle d'un singe ou d'un australopithèque, et non vers le côté comme la nôtre. Cette orientation vers le haut est une adaptation à la vie arboricole.
LES DENTS augmentent en taille de l'avant vers l'arrière, ce qui est un caractère primitif. Elles sont plutôt petites dans l'ensemble et les molaires ont des cuspides simples – des traits de formes humaines plutôt tardives.
Premier métacarpien
H. naledi
H. sapiens
LE FÉMUR a une petite tête et un long col par comparaison avec la large tête et le petit col du fémur d'H. sapiens. Ces caractéristiques suggèrent une hanche proche de celle d'un australopithèque.
LA MAIN est dotée de doigts incurvés, ce qui suggère fortement un mode de vie arboricole. Pour autant, le poignet et la paume paraissent modernes et adaptés à la manipulation d'outils. Le premier métacarpien, c'est-à-dire l'os le plus inférieur du pouce, ne semble ni humain ni australopithèque, et constitue un caractère propre.
H. naledi
Australopithecus
H. sapiens
OÙ DANS NOTRE ARBRE DE PARENTÉ ?
Selon l'équipe de Lee Berger, le mélange de caractères d'H. naledi suggère qu'il est proche de la racine du genre Homo – un endroit convoité dans l'arbre de parenté des hominines. On dispose pour H. naledi de fossiles d'os postcrâniens qui sont peu représentés dans les panoplies fossiles obtenues pour d'autres espèces anciennes du genre Homo. Cela complique le placement d'H. naledi dans l'arbre de parenté humain.
LE PIED est très proche du nôtre, hormis des orteils légèrement incurvés et une voûte plantaire un peu plus basse. Il est ainsi bien adapté à la marche en position debout. Toutefois, la combinaison d'un pied moderne avec une hanche australopithèque implique qu'H. naledi marchait différemment de nous.
H. sapiens
H. naledi
H. naledi
H. sapiens
Australopithecus (orange)
H. naledi
Premiers hominines (gris)
Homo (vert)
Paranthropus (bleu)
Millions d'années 7 6 5 4 3 2 1 Aujourd'hui
© Illustration de Portia Sloan rollings, graphique de Jen Christiansen

il n'avait encore découvert que peu de fossiles, et ses articles scientifiques ou de vulgarisation étaient taxés de vantardise et de manque de rigueur par de grandes figures de la paléoanthropologie.

En 2008, la découverte d'*Au. sediba*, de tout premier rang, a amélioré sa réputation scientifique. Même ses plus farouches détracteurs ont alors reconnu que la découverte de deux squelettes vieux de 1,98 million d'années et assez complets était spectaculaire. Beaucoup cependant n'étaient pas d'accord avec son interprétation de la découverte. Lee Berger insistait en effet depuis longtemps sur l'idée que, dans la quête des origines du genre humain, on négligeait l'Afrique du Sud. La mosaïque de caractères de types australopithèque et humain d'*Au. sediba* a ouvert la possibilité d'enraciner le genre *Homo* dans cette région, alors que les plus vieux fossiles attribués à *Homo* (tous plus anciens qu'*Au. sediba*) provenaient d'Afrique de l'Est.

Fort de son nouveau fossile étonnamment complet et aux traits si divers, Lee Berger insistait aussi sur l'idée qu'il n'était plus possible en paléoanthropologie de considérer que le « tout peut être déduit de la partie ». Bien entendu, la plupart des spécialistes rejetaient cette conclusion, qui remettait en cause des décennies de recherches en paléontologie humaine.

Dans le magazine de l'association des anciens étudiants de l'université de Californie à Berkeley, où il travaille, Tim White a écrit que les fossiles de Rising Star sont ceux d'un *H. erectus* et non ceux d'une nouvelle espèce humaine. Tim White est connu pour la découverte d'*Au. garhi*. Selon lui et d'autres chercheurs, notamment Berhane Asfaw du Service de recherche de la Vallée du Rift (*Rift Valley Research Service*, à Addis-Abeba), cet australopithèque vieux de 2,4 millions d'années est un ancêtre possible du genre *Homo*. Tim White accuse l'équipe de Rising Star d'avoir endommagé les fossiles pendant les fouilles, et d'avoir publié les résultats à la hâte. Dans un acerbe billet de blog au journal britannique *The Guardian*, il peste contre la science spectacle : « Nous assistons à la transformation d'une partie de la science en industrie du divertissement. »

Tim White n'est pas le seul à s'inquiéter. Carol Ward, de l'université du Missouri, souligne que la signification phylogénétique d'*H. naledi* reste inconnue malgré le nombre de fossiles découverts. Elle insiste sur l'importance de les dater : « C'est quand nous saurons leur âge que nous pourrons vous dire ce qu'ils impliquent pour l'évolution du genre humain, pas avant. » Carol Ward est aussi très réservée sur l'article décrivant les fossiles, dont elle note qu'il n'inclut pas assez de données permettant de les comparer à d'autres fossiles pertinents, ni d'étude phylogénétique des liens de parenté d'*H. naledi* au sein du rameau humain. « On sent une très forte envie des auteurs de relier leur découverte aux débuts du genre *Homo*, pointe-t-elle, mais sans date ou étude phylogénétique détaillée, c'est impossible. »

Les auteurs de la découverte ont une très forte envie de la relier au début du genre *Homo*

En l'état actuel des connaissances, beaucoup de chercheurs en restent à l'idée que le genre *Homo* est né en Afrique de l'Est. En mars 2015, plusieurs mois avant la publication relative à *H. naledi*, Brian Villmoare, de l'université du Nevada à Las Vegas, Kaye Reed, de l'université d'État de l'Arizona, et leurs collègues ont publié la découverte d'une hémimandibule (la moitié gauche) de 2,8 millions d'années trouvée à Ledi-Geraru, au nord-est de l'Éthiopie. Il s'agirait selon ces chercheurs du plus ancien fossile humain. Il porte en effet des traits typiquement humains ainsi que les caractères primitifs auxquels on s'attend dans une forme transitoire entre les australopithèques et les humains. En l'absence de datation, les fossiles d'*H. naledi* ne sauraient déloger l'hémimandibule de Ledi-Geraru de sa place prééminente à l'origine d'*Homo*, insiste Kaye Reed. Elle récuse du reste l'idée qu'il ne serait pas possible d'attribuer de façon fiable un fragment isolé à une espèce. « J'ai une date fiable à 2,8 millions d'années et des traits humains caractéristiques », martèle-t-elle.

Les controverses sur l'origine d'*Homo* sont en partie liées à l'absence de définition claire de ce qui fait l'humain. Pour Susan Antón, une spécialiste des premières formes humaines de l'université de New York, « *H. naledi* souligne le débat permanent sur ce qui définit l'humain ; distinguer entre les formes australopithèques et les premières formes humaines n'est évident pour personne actuellement, de sorte que des chercheurs différents ont à ce propos des visions différentes. » Susan Antón et ses collaborateurs ont choisi pour leur part de définir *Homo* et *Australopithecus* à partir du crâne, des mâchoires et des dents. D'autres chercheurs préfèrent se référer aux os postcrâniens, qui pour eux traduisent mieux comment les hominines se sont adaptés lorsqu'ils sont passés de la forêt à la savane.

Toutefois, quand on découvre des fossiles très anciens, les os postcrâniens sont le plus souvent absents. Rising Star embarrasse à cause de la richesse de son registre fossile, pointe Susan Antón. La mosaïque de caractères envoie des signaux contradictoires, d'autant plus troublants que l'équipe de Lee Berger n'a pas dit explicitement comment elle définit le genre humain et pourquoi.

Même si les fossiles de Rising Star sont bien ceux d'une nouvelle espèce humaine et même s'ils s'avèrent dater de plus de 2 millions d'années, cela ne suffira pas à convaincre les sceptiques qu'*H. naledi* est à l'origine d'*H. sapiens* ou, du moins, proche de la lignée qui en est à l'origine.

Pour Bernard Wood, de l'université George Washington, l'ossuaire de Dinaledi provient peut-être d'une population



LES DOIGTS ARQUÉS DE LA MAIN *d'Homo naledi* traduisent une adaptation à la vie arboricole. Cette main est la plus complète que l'on connaisse pour une espèce humaine éteinte.

relique dont les traits singuliers seraient le produit d'un isolement relatif. L'Afrique du Sud est un cul-de-sac situé au bas du continent africain, souligne-t-il. Selon lui, les échanges de gènes n'y étaient probablement pas aussi fréquents qu'en Afrique de l'Est, où des flux géniques peuvent parvenir du sud et d'Afrique centrale. Il illustre son raisonnement en rappelant le cas d'*H. floresiensis* – une forme humaine à petit cerveau, petite stature et dotée de traits qui ont persisté longtemps après l'irruption d'*H. sapiens* étant donné l'isolement d'*H. floresiensis* sur l'île de Florès, en Indonésie.

L'idée qu'un hominine au cerveau de la taille de celui d'*H. naledi* ait eu des rites funéraires suscite aussi une grande résistance. À ce stade, les usages funéraires sont censés avoir été l'apanage des hommes anatomiquement modernes, parmi lesquels ils se seraient généralisés il y a quelque 100000 ans, avant de l'être parmi les Néandertaliens. « Je ne rejette pas totalement l'idée que l'équipe de Rising Star ait raison, mais je lui demande des preuves plus convaincantes », confie Alison Brooks, elle aussi de l'université George Washington.

En fait, certains des membres de l'équipe ayant découvert *H. naledi* ont aussi douté de la possibilité d'un dépôt intentionnel dans Dinaledi. « J'ai déjà du mal à entrer dans cette chambre en traînant un sac à dos, témoigne Marina Elliott, alors je n'imagine pas comment quelqu'un a pu le faire en traînant un corps. Mais nous avons passé deux ans à chercher une explication alternative, en vain. »

Même si des individus *H. naledi* ont traîné des défunts jusqu'à la chambre, cela ne traduit pas forcément une sophistication cognitive, d'après Travis Pickering, de l'université de Wisconsin-Madison. Ce connaisseur du Berceau de l'humanité sud-africain estime que l'explication la plus raisonnable du remplissage de la chambre en fossiles est bien le dépôt intentionnel de corps. Toutefois, souligne-t-il, on ne peut affirmer que cela signifie qu'*H. naledi* était une espèce culturellement avancée, pratiquant des rituels funéraires ; le transport de corps au fond de la grotte avait peut-être pour objectif de simplement éviter d'avoir à cohabiter avec des cadavres en décomposition.

Lee Berger écarte toutes ces objections d'un revers de main en pointant qu'elles apparaissent dans la presse et les réseaux sociaux, mais pas dans les revues scientifiques. Et il défend fermement la qualité du travail effectué par son équipe. Les dommages sur les os, il les explique par le passage de spéléologues dans la chambre avant les fouilleurs. Pour lui, ces derniers n'ont pas été négligents, et la vitesse à laquelle son équipe a travaillé résulte simplement d'une situation favorable : au lieu d'être enchâssés dans la roche, comme souvent en Afrique du Sud, les fossiles de Dinaledi se trouvent dans un sol humide facile à dégager. En outre, contrairement aux autres équipes, qui sont petites et ne fouillent que six à huit semaines par an loin de leurs bureaux, son équipe était nombreuse et fouillait à deux pas de l'université, de sorte qu'en termes de temps investi par fossile, son équipe a travaillé autant que celle de toute expédition paléontologique typique.

Les géologues travaillent à dater *Homo naledi*

Quant à Tim White, à qui *H. naledi* semble un *H. erectus* primitif et non une nouvelle forme, « il est de toute façon en désaccord avec tout ce qu'il n'a pas nommé lui-même ! », raille Lee Berger. Attribuer les fossiles d'*H. naledi* à un *H. erectus* signifierait que cette espèce était plus diverse qu'*H. sapiens*, ce qui lui semble improbable. En outre, *H. naledi* présente des traits propres que l'on n'observe chez aucun autre hominine. « Si nous pensons en biologistes de l'évolution, cet argument ne tient pas, assène Lee Berger. Franchement, je suis surpris que les gens ne soutiennent pas plutôt que nous avons affaire à un nouveau genre, plutôt qu'à juste une nouvelle espèce. »

Interrogé sur la datation des fossiles de Rising Star, Lee Berger affirme que les géologues y travaillent. Il maintient que la connaissance de son âge ne changera pas la façon dont il relie *H. naledi* aux autres membres de la famille humaine. Bien qu'*H. naledi* présente certaines caractéristiques clés d'*Homo*, l'image d'ensemble est à certains égards plus primitive que celle d'*H. habilis* et, d'ailleurs, que celle de la mâchoire de Ledi-Geraru, qui détient actuellement le titre de plus vieux fossile humain. Quel que soit l'âge que se verront attribuer les fossiles de Rising Star, ils impliquent que la branche d'*H. naledi* s'est séparée de notre arbre de parenté avant les autres branches humaines. Si les fossiles sont jeunes, alors

ils proviennent simplement du sommet de cette branche.

Pourquoi, alors, l'équipe n'a-t-elle pas inclus une étude phylogénétique dans l'article annonçant que les fossiles appartenaient à une nouvelle espèce ? Pour comprendre comment des organismes sont reliés les uns aux autres, les biologistes de l'évolution utilisent la cladistique, une méthode pour définir des clades, c'est-à-dire des classes d'organismes partageant avec un ancêtre commun un certain nombre de traits : les caractères ancestraux.

Le problème est que la cladistique n'est applicable que si les caractères ancestraux sont observables chez tous les organismes censés appartenir au clade. Or les énormes biais de fossilisation ont produit que les fossiles humains, souvent réduits à un fragment de squelette, représentent très incomplètement l'organisme dont ils sont issus. Les paléoanthropologues ont tendance à fonder leurs analyses cladistiques sur des caractéristiques observées sur des crânes et des dents ; des crânes parce que leur forme varie beaucoup chez les hominidés, de sorte qu'ils sont considérés comme bien caractéristiques des espèces ; et des dents parce que ce sont les fossiles les plus fréquents. Pour les périodes anciennes, les autres os du squelette ne sont en général pas découverts en association avec un crâne ou des dents, de sorte qu'il peut être difficile de les attribuer à une espèce définie par des fossiles crâniens seulement. En outre, les restes fossiles étant en général incomplets, un élément connu chez une espèce est souvent absent chez une autre.

De fait, certains des traits clés d'*H. naledi* – dont ses ensembles presque complets d'os de la main et du pied – ne sont que partiellement représentés dans les témoignages fossiles d'autres espèces humaines, telles qu'*H. erectus* et *H. habilis*, ou même ne sont pas représentés du tout. En l'absence d'ossements avec lesquels on pourrait comparer leurs fossiles postcrâniens, les chercheurs ont dû se contenter d'appliquer la cladistique aux traits crâniens ; toutefois, certains des résultats ainsi obtenus sont dénués de sens, ce qui suggère qu'*H. naledi*, malgré ses nombreuses caractéristiques primitives, est plus étroitement apparenté à *H. sapiens* qu'au beaucoup plus ancien *H. erectus*.

Pour Lee Berger, cette expérience montre une fois de plus que les arbres de parenté fondés sur les données provenant d'une seule région anatomique, tels le crâne ou les dents, ne sont pas fiables.

Lee Berger reste persuadé qu'*H. naledi* va « secouer » l'arbre de parenté du genre *Homo*, mais n'attend pas de ses pairs qu'ils le croient sur parole. Rompant avec les habitudes du milieu paléoanthropologique, il a rendu les fossiles de Rising Star disponibles à tout chercheur en mettant en ligne sur le site MorphoSource des scanographies en trois dimensions de 91 os cruciaux ; et cela, le jour de la publication sur *eLife*. La résolution des images n'est pas encore assez élevée pour rendre possible des recherches originales, « mais elle l'est assez pour vérifier ce que nous disons », affirme Lee Berger.

« Il est très positif que les gens aient accès aux fossiles ; les plaintes ne sont que du bruit », fait remarquer David Strait, de l'université Washington à Saint Louis. Il rappelle à ce propos un article écrit par Tim White en 2000, où il écrivait qu'étant donné le vif intérêt du grand public pour les origines de l'homme, les paléoanthropologues ont le devoir particulier d'obtenir des résultats justes. « C'est complètement faux, s'insurge-t-il. Bien entendu, nous devons nous efforcer de travailler correctement, mais la science avance par réfutations d'hypothèses. Nous restreignons le champ des passés possibles, mais il peut toujours se produire que de nouvelles données changent notre vision. » En mettant ses données à la disposition de ses collègues, Lee Berger leur offre la possibilité de le contredire.

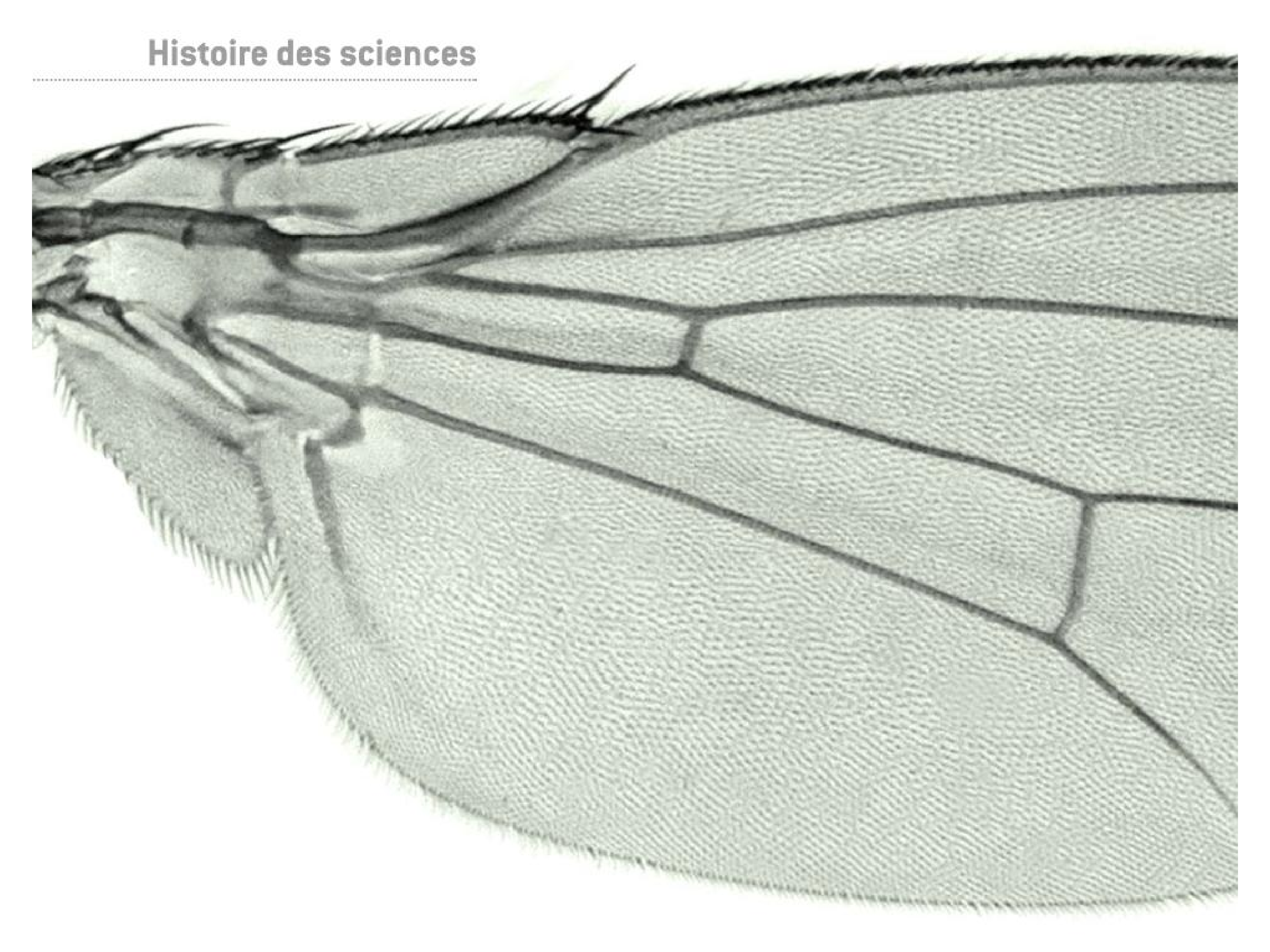
Le spectacle doit continuer

À Rising Star, les fouilles vont se poursuivre, avec ou sans l'approbation des mécontents. Les géologues s'affairent à reconstituer l'histoire de la grotte, les fouilleurs extraient des fossiles supplémentaires, les biologistes moléculaires tentent d'extraire de l'ADN. Et les chasseurs de fossiles cherchent d'autres pistes. « *H. naledi* devrait déclencher la plus grande ère d'exploration jamais vue », déclare Lee Berger avec sa ferveur caractéristique. Et de nous annoncer que des découvertes de « plus d'un » nouveau site ont déjà été faites ; et qu'elles font « battre son cœur aussi vite que Rising Star l'a fait ». Le spectacle va continuer ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

L. R. Berger *et al.*, ***Homo naledi*, a new species of the genus Homo from the Dinaledi chamber, South Africa**, *eLife*, article n° 09560, en ligne le 10 septembre 2015.

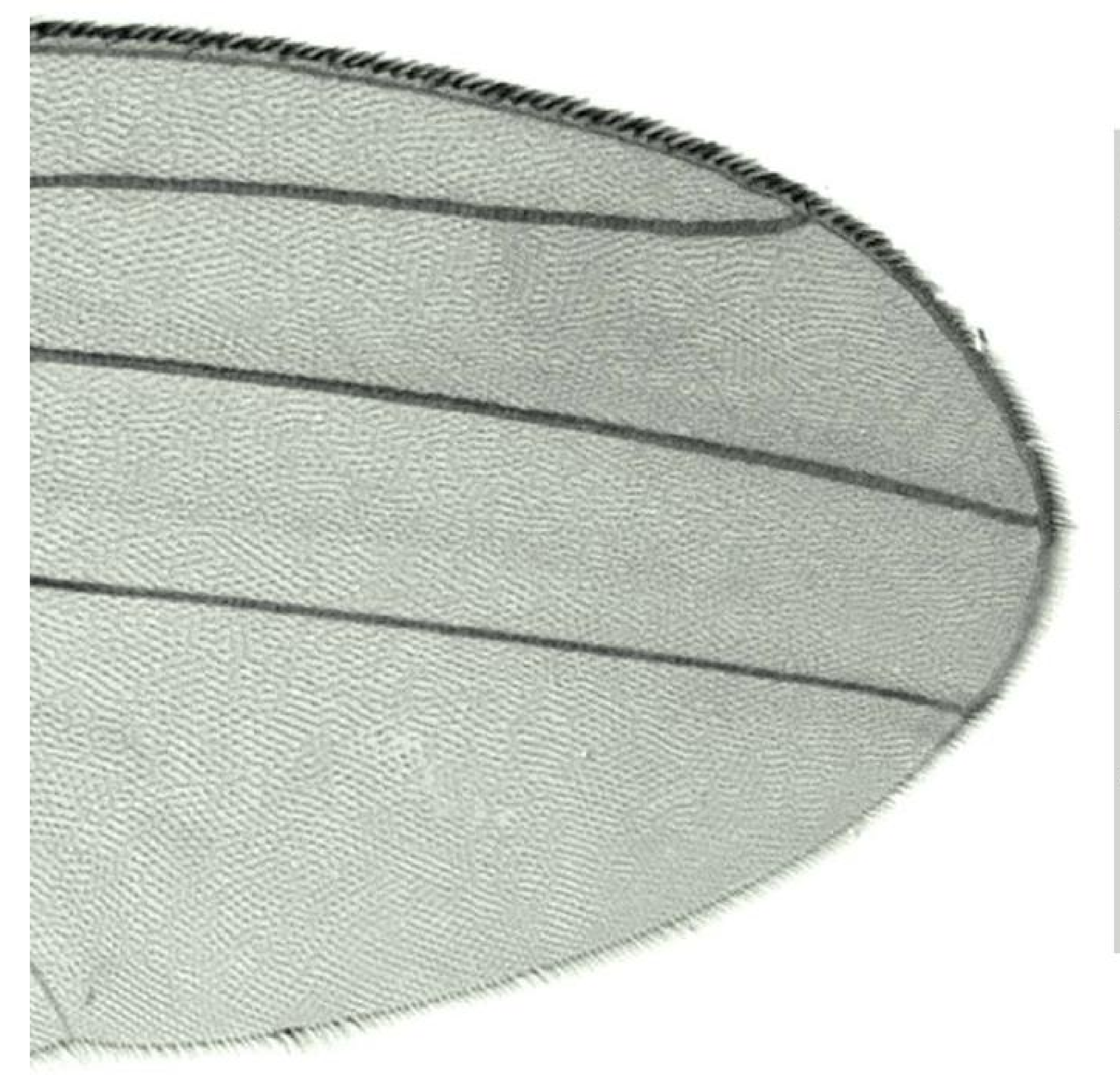
P. H. G. M. Dirks *et al.*, **Geological and taphonomic context for the new Hominin species *Homo naledi* from the Dinaledi chamber, South Africa**, *eLife*, article n° 09561, en ligne le 10 septembre 2015.



COMMENT LA MOUCHE A PERDU SON AILE... ET LA RUSSIE SA DÉCOUVERTE

Stéphane Schmitt

Une seule mutation, et les ailes de la drosophile deviennent des balanciers. Découvertes il y a un siècle, les mutations de ce type ont mis deux chercheurs russes sur la voie de la compréhension du rôle des gènes dans l'embryogenèse et l'évolution. Mais la politique s'en est mêlée...



© Martin Hauser Phycus

L'ESSENTIEL

- En 1915, le généticien américain Calvin Bridges observa une curieuse mutation chez une mouche : une deuxième paire d'ailes.
- D'autres mutations furent découvertes, telles que des balanciers à la place des ailes ou des pattes à la place des antennes.
- Deux généticiens russes y virent un moyen de comprendre le fonctionnement des gènes et leur rôle dans l'évolution et le développement.
- Avortées à cause de la politique stalinienne, leurs recherches préfigurèrent néanmoins une discipline majeure en biologie, l'« évo-dévo ».

Voici un siècle, une curieuse découverte eut lieu à l'université Columbia de New York, dans le laboratoire de Thomas Morgan. Ce dernier, l'un des fondateurs de la génétique, avait choisi depuis quelques années un nouveau modèle animal, la drosophile, et, aidé de quelques assistants, il cherchait à identifier chez cette petite mouche toutes les mutations possibles, afin d'en étudier la transmission héréditaire.

À l'époque, on ne connaissait pas encore l'ADN, le support matériel des gènes. Mais Morgan pensait, avec d'autres, que les facteurs héréditaires, déjà nommés gènes, étaient disposés le long des chromosomes – ce réseau filamenteux découvert une quarantaine d'années plus tôt dans le noyau des cellules. Il cherchait donc à établir une cartographie précise des mutations – et par conséquent des gènes qu'elles affectaient – sur les différents chromosomes de la drosophile. Pour cela, il répertoriait toutes les mutations connues, puis effectuait des croisements entre les mouches mutantes obtenues et des mouches normales. Son idée était que plus deux mutations étaient proches sur un chromosome, plus elles avaient de chance d'être transmises ensemble à la descendance. En analysant la transmission des mutations deux à deux, il évaluait ainsi la distance qui les séparait sur les chromosomes.

À partir des années 1910, ce qu'on appela le « labo des mouches » a ainsi identifié et localisé des centaines de mutations. Certaines affectaient la couleur des yeux, d'autres la forme des ailes, d'autres encore la disposition des soies... Mais le 22 septembre 1915, l'un des assistants de Morgan, Calvin Bridges, observa « un nouveau caractère de nature surprenante ». Le thorax de la drosophile concernée semblait dédoublé : au lieu d'avoir une seule paire d'ailes (comme c'est le cas chez les diptères), la mouche en possédait deux, même si la seconde était plus petite et tordue. Il nomma cette mutation *bithorax*.

À y regarder de plus près, il ne s'agissait pas exactement d'un dédoublement, mais d'une transformation d'une partie du thorax en une autre : alors que, chez une drosophile normale, seul le deuxième des trois segments du thorax porte des ailes, le troisième segment des individus *bithorax* en arborait aussi, à la place des balanciers habituels (de petites structures qui aident à la stabilisation lors du vol). En d'autres termes, le troisième segment s'était transformé en un autre deuxième segment.

Les mutations de ce type, provoquant la transformation d'une partie de l'organisme en une autre, ont été qualifiées par la suite d'« homéotiques », et de nombreux autres cas ont été mis en évidence à partir des années 1920. Très vite, des biologistes virent en elles un modèle de choix pour étudier, d'une part, le fonctionnement des gènes dans le développement et, d'autre part, les modalités de l'évolution des espèces.

Cette idée était appelée à un brillant avenir. Aujourd'hui encore, cette approche, que l'on nomme la biologie évolutive du développement ou l'« évo-dévo », est l'un des champs de recherche les plus actifs des sciences de la vie. Pourtant, son histoire n'a pas été linéaire. Ni Morgan ni Bridges n'avaient pressenti l'intérêt des mutations homéotiques, et si des savants russes eurent dès 1929 l'idée de les utiliser pour relier le développement des individus et l'évolution des espèces, ils durent rapidement abandonner leurs recherches en raison du contexte politique.

■ L'AUTEUR



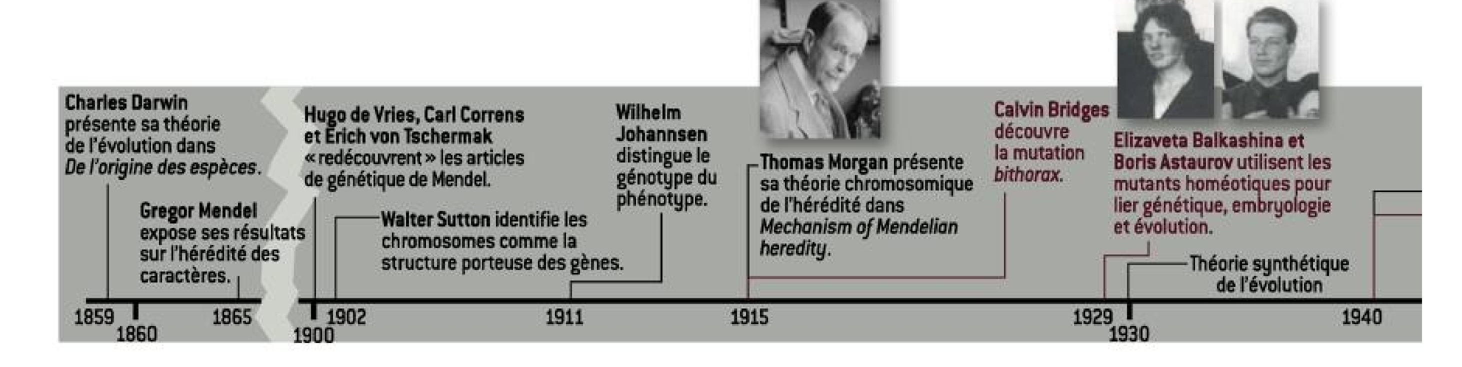
Stéphane SCHMITT est directeur de recherche au laboratoire Sphere (Sciences, philosophie, histoire – UMR 7219, CNRS), à l'université Paris-Diderot.

Une antenne à la place d'un œil

Dès la fin du XIXe siècle, avant l'émergence de la génétique, certains scientifiques s'étaient intéressés aux transformations d'un organe en un autre. En 1894, le biologiste anglais William Bateson, cherchant à comprendre la manière concrète dont les espèces évoluaient, avait mis en cause le scénario, privilégié par Darwin, d'une évolution très lente et graduelle. Convaincu que, au contraire, il se produisait parfois d'importantes discontinuités dans l'évolution, il avait entrepris de recenser toutes les anomalies observées dans la nature. Parmi elles, il avait accordé une attention particulière aux remplacements d'organes.

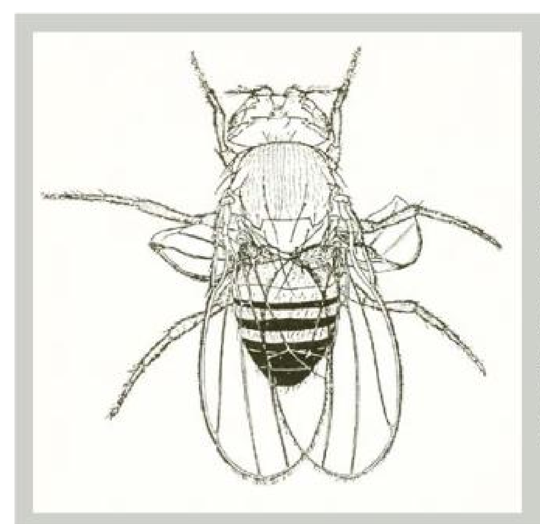
Par exemple, il avait relevé un cas de transformation d'antenne en patte chez un insecte, ou d'œil en antenne chez un crustacé. Pour décrire ce phénomène, il avait introduit le terme « homéose », dérivé de *homoios* – « semblable » en grec –, afin d'insister sur le fait que les deux structures, remplacée et remplaçante, présentaient une similitude fondamentale. Ces cas, selon lui, donnaient une idée des « sauts évolutifs » qui avaient eu lieu au cours de l'histoire des espèces.

Cependant, Bateson ne poursuivit pas ses recherches dans cette direction et il se tourna, après 1900, vers la génétique naissante. Pour autant, le concept d'homéose ne fut pas oublié. D'autres biologistes le récupérèrent et l'étudièrent d'un tout autre point de vue. Ils portèrent leur attention non



pas sur les variations spontanées survenues dans la nature, mais sur les homéoses provoquées expérimentalement : ils avaient en effet remarqué que, chez certains organismes capables de régénération, cette dernière produisait parfois des anomalies. Par exemple, en 1900, le biologiste allemand Curt Herbst avait observé, en amputant les yeux pédonculés d'une crevette, que l'organe régénéré était un œil ou une antenne, selon qu'il laissait ou non en place le ganglion optique sous-jacent. Cela suggérait que ce ganglion orientait le développement vers la formation d'un œil plutôt que d'une antenne.

Dans ce contexte, l'homéose était vue comme un moyen de comprendre non pas les modalités de l'évolution, mais les mécanismes du développement. Toutefois, certains auteurs, tel l'Autrichien Hans Przibram, tentèrent de lier les deux approches et considérèrent que les régénérations homéotiques comme celle décrite par Herbst étaient des atavismes, c'est-à-dire des retours vers des formes ancestrales.



LA MOUCHE MUTANTE que le généticien américain Calvin Bridges découvrit en 1915 était étrange. À la place de ses balanciers – de petites structures qui stabilisent l'insecte en vol –, la drosophile arborait deux petites ailes tordues. Bridges, préoccupé avant tout par l'étude du génotype, ne chercha pas à utiliser cette mutation pour comprendre le lien entre le développement embryonnaire, la génétique et l'évolution des espèces.

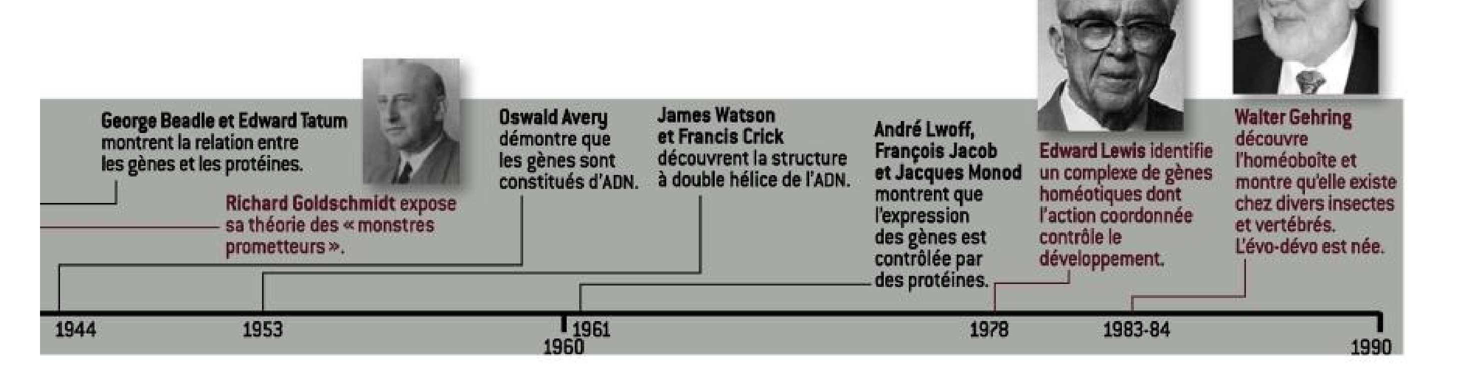
C. Bridges et T. Morgan, *The Third Chromosome Group of Mutant Characters in Drosophila melanogaster*, Carnegie Institute of Washington Publications, vol. 327, p. 138, 1923

De New York à Moscou

Ainsi, dès la première décennie du XXe siècle, le phénomène d'homéose, spontanée ou expérimentale, était déjà bien connu et se trouvait à la confluence des recherches sur le développement et l'évolution. Aussi, lorsque Bridges découvrit la mutation *bithorax*, il aurait pu, *a priori*, faire le lien avec tous ces travaux. Pourtant, il n'en fit aucune mention dans l'article où il décrivait le mutant, publié en 1923, et n'employa même pas le terme « homéose », se contentant de réaliser les expériences de cartographie génétique caractéristiques du groupe de Morgan.

Cette attitude était tout à fait représentative des centres d'intérêt de la génétique américaine à ses débuts : préoccupée avant tout par l'étude de la transmission des gènes et de leur localisation sur les chromosomes, elle n'accordait que peu d'importance au fonctionnement de ces gènes et à la manière dont ils affectaient le phénotype (l'ensemble des caractères visibles). Peu importait le phénotype associé à un gène et à ses mutations, c'était avant tout ce gène lui-même et sa position par rapport aux gènes voisins que l'on considérait. C'est donc hors d'Amérique, en Russie, que le concept de gène homéotique émergea et que l'on tenta pour la première fois de s'en servir pour lier embryologie, génétique et évolution.

Juste après la révolution d'Octobre 1917, était apparue une école russe de génétique particulièrement féconde et ouverte, qui contribua, entre autres, à la naissance de la génétique des populations. Les travaux de Morgan et de ses collaborateurs sur la drosophile y suscitaient beaucoup d'intérêt et, comme à Columbia, on y recherchait de nouveaux mutants. C'est dans ce contexte que deux jeunes généticiens de l'institut



L'ère de l'évo-dévo

La biologie évolutive du développement ou, plus familièrement, l'« évo-dévo », est le nom donné depuis une trentaine d'années à l'étude des relations entre génétique, développement embryonnaire et évolution.

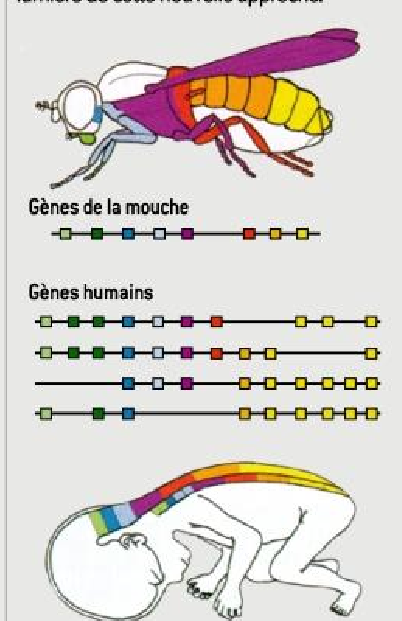
En un sens, cette discipline a des racines anciennes. Dès le XIXe siècle, les biologistes se sont intéressés aux rapports entre embryologie et évolution, et, tout au long du XXe siècle, des auteurs tels que Elizaveta Balkashina, Boris Astaurov et Richard Goldschmidt ont tenté de comprendre le rôle des gènes à la fois dans le développement et dans l'évolution. Mais cette histoire s'est considérablement accélérée autour de 1980, pour diverses raisons.

En premier lieu, une fois élucidés les mécanismes moléculaires fondamentaux de la génétique, à partir des années 1960, ces résultats ont été appliqués à la compréhension du développement. D'autre part, de nouvelles techniques de biologie moléculaire, telles que le clonage ou l'hybridation *in situ* (qui permet de visualiser l'expression d'un gène donné dans un tissu ou un organisme), ont rendu possible une approche directe de l'action des gènes lors du développement.

Plusieurs résultats spectaculaires obtenus sur la drosophile ont marqué la naissance de l'évo-dévo. Les travaux d'Edward Lewis aboutirent, en 1978, à un modèle dans lequel un complexe de gènes homéotiques contrôle la mise en place de l'axe antéro-postérieur de l'animal. En 1983, Walter Gehring et ses collègues découvrirent dans les gènes homéotiques de la drosophile un segment d'ADN remarquable, l'homéoboîte. Dans les protéines codées par les gènes homéotiques (les homéoprotéines), cette homéoboîte correspond à une région, l'homéodomaine, capable de se fixer sur des séquences spécifiques d'ADN. On commença ainsi à comprendre comment les protéines produites par les gènes homéotiques, en interagissant avec l'ADN et en régulant l'expression d'autres gènes, contrôlaient certaines étapes du développement. L'union de la génétique moléculaire et de la biologie du développement était scellée.

Dès 1984, l'équipe de Gehring mit en évidence l'existence de l'homéoboîte non seulement dans d'autres insectes que la drosophile, mais aussi chez la souris et l'homme. Il s'avéra donc que les mêmes gènes du développement se retrouvaient dans des groupes d'animaux très divers et que, par conséquent, ils avaient dû jouer un rôle essentiel dans l'évolution des plans d'organisation. La voie était alors ouverte pour une vaste synthèse entre génétique du développement et sciences de l'évolution.

Depuis lors, l'évo-dévo constitue l'un des champs de recherches les plus actifs dans les sciences de la vie. Elle permet de comprendre comment des modifications survenues dans les mécanismes du développement ont été à l'origine de changements évolutifs majeurs : par exemple comment des organismes composés de segments quasi identiques ont évolué en des animaux aux segments très différenciés, tels que les insectes ; ou comment, à la suite d'une inversion de l'axe dorso-ventral, la chaîne nerveuse ventrale des arthropodes s'est retrouvée en position dorsale chez les vertébrés. De nombreuses questions anciennes en zoologie évolutive, telle l'origine des membres ou des organes visuels, ont pu être réexaminées à la lumière de cette nouvelle approche.



LES DIFFÉRENTS GÈNES HOMÉOTIQUES ***(au centre, en couleur)*** **forment des complexes que l'on retrouve chez la plupart des animaux. Ils s'expriment de façon similaire dans toutes les espèces, le long de l'axe du corps, et dans le même ordre que celui de leur position sur le chromosome.**

Adapté avec la permission de Macmillan Publishers Ltd: [PEDIATRIC RESEARCH] (M. Mark et al., Homeobox Genes in Embryogenesis and Pathogenesis), © (1997)

Koltsov de Moscou, Boris Astaurov et Elizaveta Balkashina, découvrirent au milieu des années 1920 deux nouvelles mutations produisant des remplacements d'organes : *tetraptera* (« quatre ailes », en grec), qui présentait un phénotype très proche de *bithorax*, et *aristapedia*, qui provoquait la transformation de la partie distale de l'antenne (l'« arista ») en une structure ressemblant à la partie distale d'une patte. Ces découvertes furent présentées dans deux articles parus en 1929 dans une revue allemande. Les deux Russes y exposaient les résultats d'expériences de croisements similaires à celles qu'effectuaient les généticiens américains. Mais ils ne s'en tenaient pas là.

En premier lieu, ils appelaient « homéose » les anomalies observées, établissant ainsi un lien avec tous les cas décrits sous cette dénomination depuis Bateson. D'autre part, contrairement aux Américains, ils se demandaient comment agissaient ces gènes dont les mutations provoquaient une homéose. Balkashina, en particulier, étudia avec précision le développement des antennes chez des drosophiles *aristapedia* et le compara à celui d'antennes normales.

L'idée d'Elizaveta

Elle proposa un modèle où les gènes concernés perturbaient la chronologie du développement : selon elle, la manière dont se développait un disque imaginal – l'ébauche larvaire à partir de laquelle se forme un organe de l'insecte adulte – dépendait du moment auquel commençait ce développement. En effet, dans une drosophile normale, les disques imaginaux des pattes entament leur transformation en pattes à un certain moment, ceux des antennes un peu plus tard. Or Balkashina montra que, chez une drosophile *aristapedia*, la différenciation des disques imaginaux des antennes était accélérée au point d'avoir lieu en même temps que celle des disques imaginaux des pattes : cela expliquait, d'après elle, qu'ils donnent eux aussi, chez ce mutant, des structures ressemblant à des pattes.

Bien sûr, la généticienne ignorait tout de la nature chimique des gènes et des modalités moléculaires de leur action, qui n'ont été élucidées qu'à partir des années 1950. Toutefois, dès 1929, elle tenta de comprendre leur fonctionnement, et utilisa pour cela l'homéose.

Balkashina et Astaurov virent aussi les implications des mutations homéotiques

pour la théorie de l'évolution. Ils reprirent à cet égard les réflexions de Przibram : pour eux, l'existence d'homéoses d'origine génétique, provoquant la transformation de balanciers en ailes ou d'antennes en pattes, prouvait que les ailes et les balanciers, d'une part, les antennes et les pattes, d'autre part, avaient une origine commune. Ces mutations étaient donc des atavismes et reproduisaient des états ancestraux dans lesquels ces organes n'étaient pas encore différenciés. Par exemple, la mutation *tetraptera* faisait réapparaître chez la drosophile une seconde paire d'ailes, c'est-à-dire un caractère qui existait chez un lointain insecte ancestral, mais qui avait disparu dans la lignée des diptères, où la seconde paire d'ailes s'était transformée en balanciers.

Des monstres prometteurs

Sur le plan historique, ces travaux russes revêtent une importance considérable. Ils représentent une première tentative de synthèse entre génétique, biologie du développement et évolution, à une époque où ces questions étaient encore le plus souvent séparées, notamment chez les généticiens américains. Toutefois, ces débuts prometteurs furent rapidement interrompus.

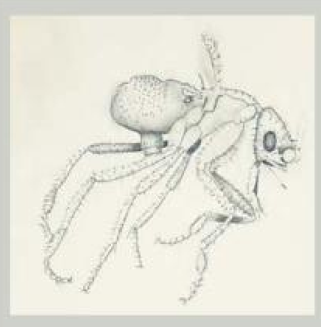
Les années 1930 virent en effet l'ascension en URSS des idées de Trofim Lyssenko. Partisan de l'hérédité des caractères acquis, cet agronome s'opposa vigoureusement à la génétique de Morgan, jugée « bourgeoise » et « réactionnaire », et bénéficia en cela du soutien du parti communiste et de Staline. La plupart des généticiens russes furent alors inquiétés, exilés, voire envoyés au goulag pour certains. Balkashina fut arrêtée et expédiée en Asie centrale, et Astaurov partit à Tachkent travailler sur le ver à soie. S'ils parvinrent à survivre à cette période, ils durent abandonner les études qu'ils avaient entreprises depuis les années 1920. Celles-ci inspirèrent cependant d'autres travaux, en Allemagne cette fois.

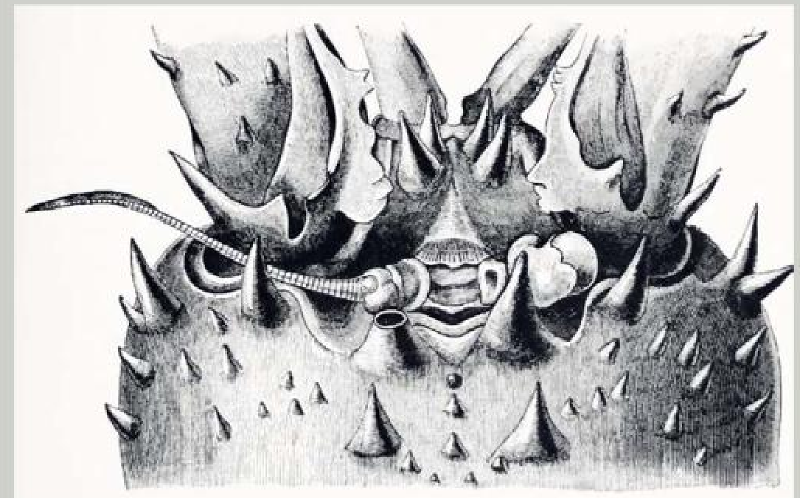
La génétique allemande présentait, dans les années 1920, des points communs avec la génétique russe. L'une et l'autre, contrairement à la génétique américaine de l'époque, s'intéressaient non seulement à la transmission des gènes et à leur position sur les chromosomes, mais aussi à leur mode de fonctionnement et au contrôle du phénotype par le génotype. Richard Goldschmidt, directeur de la section de génétique à l'institut Kaiser-Wilhelm, à Berlin, depuis 1914, appelait ce domaine la « génétique physiologique ». En fait, il allait plus loin : non content de mettre l'accent sur des sujets négligés par Morgan et ses collaborateurs, c'est plus généralement la conception classique du gène qu'il mettait en cause. Selon lui, les différents caractères n'étaient pas contrôlés par des gènes corpusculaires alignés sur des chromosomes comme les perles d'un collier, mais les chromosomes agissaient dans leur totalité, conformément à leur structure globale.

Par ailleurs, à partir des années 1930, Goldschmidt critiqua aussi la théorie synthétique de l'évolution, qui était alors en train de s'imposer. Cette théorie était la synthèse de la génétique morganienne et de la conception darwinienne de l'évolution (selon laquelle la sélection naturelle s'exerce sur des variations aléatoires survenant dans les populations). Dans ce modèle, les variations spontanées postulées par Darwin étaient identifiées aux mutations ponctuelles que les généticiens étudiaient. L'un des points essentiels était que les mutations présentant un intérêt évolutif étaient supposées ne modifier que très faiblement le phénotype :

À ÉCOUTER

Le jeudi 2 juin 2016, de 16 h à 17 h, Stéphane Schmitt reviendra sur les 100 ans de la découverte des gènes homéotiques dans la partie *Actualités* de l'émission **La marche des sciences,** sur France Culture. **www.franceculture.com**





ET SI L'ÉVOLUTION DES ESPÈCES fonctionnait par « sauts » bien visibles, dus à des mutations qui modifieraient le développement ? C'est ce que pensait le biologiste anglais William Bateson en 1894, en examinant une langouste dont l'œil pédonculé s'était transformé en antenne *(ci-dessous)*. Pour le généticien allemand Richard Goldschmidt, l'existence du diptère *Termitoxenia (ci-contre)* allait aussi dans ce sens. Sa paire d'ailes a été remplacée par deux balanciers : la mutation aurait permis à l'insecte de coloniser un nouvel habitat, la termitière.

J. Assmuth, Nova Acta Leopoldina, vol. 98, pl. XI, fig. 2, 1913, université de l'Illinois Urbana-Champaign (en haut) ; W. Bateson, Materials for the Study of Variation, 1894, NCSU Libraries (en bas)

on conciliait ainsi l'idée d'une évolution très lente, graduelle, comme l'avait imaginée Darwin, avec la nécessaire discontinuité des mutations génétiques.

Or, pour Goldschmidt, la nature du matériel génétique tel qu'il le concevait allait à l'encontre de cette idée, puisque les notions mêmes de gène et de mutation ponctuelle lui posaient problème. Dans son modèle, certaines mutations affectaient la structure générale des chromosomes et se traduisaient par des modifications systémiques du développement. Elles produisaient ainsi, d'un seul coup, des individus d'aspect très différent de leurs parents. Parfois, selon Goldschmidt, ces individus présentaient un avantage sélectif. Ils constituaient alors ce qu'il nommait des « monstres prometteurs ». Or les mutants homéotiques représentaient exactement ce que pouvaient être de tels sauts évolutifs : en une seule étape, un organe se trouvait remplacé par une autre structure, certes anormale, mais dotée d'emblée d'une organisation potentiellement fonctionnelle.

Bridges n'imaginait sans doute pas, en 1915, que la mutation qu'il venait de trouver aurait une telle importance dans l'histoire de la biologie

Étant donné ses origines juives, Goldschmidt avait dû quitter l'Allemagne en 1935 et avait obtenu un poste de professeur à l'université de Californie à Berkeley. Il s'y consacra en grande partie à l'étude des mutations homéotiques. En particulier, il s'intéressa à la mutation *tetraltera*, découverte en 1934, dont le phénotype était l'inverse de *bithorax* : au lieu d'avoir deux ailes et deux balanciers, la drosophile mutante possédait quatre balanciers.

Goldschmidt tenta de comprendre les mécanismes développementaux qui soustendaient cette transformation, recourant pour cela à des explications en partie inspirées de celles des généticiens russes. Mais il rechercha aussi des espèces qui, à l'état normal, présentaient un aspect semblable à celui de mutants homéotiques. C'était le cas, par exemple, du diptère *Termitoxenia*, doté d'une paire de balanciers à la place des ailes et adapté par conséquent à la vie à l'intérieur des termitières (où des ailes seraient un handicap). Goldschmidt expliquait l'apparition d'une telle forme par la survenue, chez l'ancêtre à deux ailes de *Termitoxenia*, d'une mutation homéotique similaire à *tetraltera* : le « monstre prometteur » qui en avait résulté avait pu coloniser un nouveau milieu, la termitière.

Les conceptions de Goldschmidt apparurent cependant comme marginales, à une époque où triomphaient la génétique morganienne et la théorie synthétique de l'évolution, et elles n'eurent pas de postérité immédiate. Néanmoins, l'histoire de l'homéose était loin d'être terminée. Dès les années 1950, le généticien américain Edward Lewis s'empara du sujet. Il entreprit une étude précise des mutations homéotiques de la drosophile et de leur position sur le chromosome. Tout en restant dans le cadre de la génétique morganienne, il prit en compte les avancées récentes de la biologie moléculaire pour tenter de comprendre comment ces gènes agissaient.

Il identifia ainsi tout un complexe de gènes homéotiques qui fut appelé Bithorax, d'après le nom de la mutation découverte par Bridges. Ces travaux le menèrent, en 1978, à l'élaboration d'un modèle dans lequel les gènes de ce complexe contrôlaient de façon coordonnée la mise en place de l'axe antéropostérieur de la drosophile, chacun d'eux déterminant l'identité d'un segment du corps. Il montra de plus que l'ordre des gènes sur le chromosome correspondait à celui des segments le long de l'axe du corps.

Quelques années plus tard, les mécanismes d'action moléculaire de ces gènes homéotiques commencèrent à être compris. On découvrit en même temps qu'ils se retrouvaient dans des groupes aussi différents que les insectes et les mammifères, ce qui ouvrit la voie à une étude comparée des processus développementaux dans tout le règne animal. Ces travaux aboutirent ainsi, dans les années 1980, à l'émergence d'un champ nouveau, la biologie évolutive du développement ou évo-dévo, synthèse de la génétique moléculaire, de la biologie du développement et des sciences de l'évolution.

Depuis lors, de nombreux autres gènes de développement ont été mis en évidence, mais les gènes homéotiques continuent de représenter, en quelque sorte, un paradigme au sein de l'évo-dévo. Bridges n'imaginait sans doute pas, en 1915, que la mutation qu'il venait de trouver aurait une telle importance dans l'histoire de la biologie. ■

■ **BIBLIOGRAPHIE**

S. Schmitt, **Histoire d'une question anatomique : la répétition des parties,** MNHN, 2004.

W. J. Gehring, **La Drosophile aux yeux rouges,** Odile Jacob, 1999.

france culture

C'EST POUR VOUS

LA MARCHE DES SCIENCES

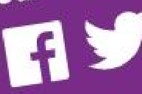
DÉCOUVERTES, INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE



AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
16H - 17H

en partenariat avec POUR LA SCIENCE

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr





LOGIQUE & CALCUL

Le nombre π est partout !

L'ubiquité du nombre π ne cesse d'étonner. Récemment encore, il est apparu là où personne ne s'attendait à le trouver : dans un système simple de collisions, dans la conjecture de Syracuse, dans le jeu de la vie...

Jean-Paul DELAHAYE

L'ubiquité est « le fait d'être présent partout à la fois ou en plusieurs lieux en même temps. » De tous les nombres, π est celui qui jouit le plus spectaculairement de cette propriété : on le rencontre sans cesse en mathématiques et en physique. L'une des conséquences de cette ubiquité est qu'on découvre encore de nouvelles façons de calculer π. Il est devenu difficile de battre les formules qui évaluent très vite ce nombre, parce que les meilleures méthodes connues résultent de recherches approfondies, qu'elles sont d'une grande subtilité, et qu'elles sont d'une époustouflante efficacité.

Aujourd'hui, le record de calcul donne 13 300 milliards de décimales de π et se fonde sur plusieurs formules, telle celle-ci, due aux frères David et Gregory Chudnowsky :

$$\frac{1}{\pi}=12\sum_{k=0}^{\infty}(-1)^k\frac{(6k)!(13591409+545140134k)}{(3k)!(k!)^3(640320)^{3k+3/2}}$$

Bien que ne pouvant entrer en concurrence avec cette extraordinaire formule (en se limitant au terme $k=0$, on trouve $\pi = 3{,}1415926535897342...$, ce qui est correct jusqu'au 14e chiffre), nous allons, pour le défi, la beauté ou même l'amusement et l'étonnement, présenter quelques-unes des étranges nouvelles méthodes de calcul de π.

Commençons par les méthodes utilisant des procédés physiques. La méthode de Monte-Carlo pour calculer π se fonde sur un principe très simple : la surface d'un disque de rayon r est πr^2. Elle permet d'obtenir expérimentalement quelques décimales de π. On fait tomber au hasard des grains de sable sur un carré de côté r ; si les grains le recouvrent uniformément, la proportion de grains tombés dans le quart de disque de rayon r donne une valeur approchée de $\pi/4$: la superficie du carré est r^2, celle du quart de disque est $\pi r^2/4$, donc le rapport est $\pi/4$ *(voir l'encadré ci-contre, a)*.

Si par exemple on lâche 1 000 grains de sable et qu'il y en a 780 qui tombent dans le quart de disque, cela donne l'approximation $\pi = 4 \times 780/1\,000 = 3{,}12$. En pratique, cette méthode souffre d'un grave défaut : elle suppose que l'on sache disposer des grains de sable uniformément sur le carré. Or en les lançant vers le centre, par exemple, les grains de sable auront une distribution plus dense vers le centre et plus éparse sur les bords. Le calcul sera faussé !

Il existe cependant des méthodes statistiques permettant de corriger cette non-uniformité. L'une d'elles consiste à compter le nombre de grains en affectant à chaque grain P un coefficient inversement proportionnel au nombre de grains situés dans un petit cercle autour de P. Les grains situés dans une zone dense sont ainsi comptés moins, ce qui corrige la non-uniformité.

Vincent Dumoulin et Félix Thouin, de l'université de Montréal, ont utilisé une méthode de ce type en tirant sur une cible distante de 20 mètres avec un fusil. Les expérimentateurs ont ainsi créé 30 857 trous dans la cible. Le calcul, avec correction de la non-uniformité, a donné $\pi = 3{,}131$, ce qui correspond à une erreur de 0,3 %.

La méthode des aiguilles de Buffon est un autre moyen de tirer de la physique des valeurs approchées de π. On lance n aiguilles de longueur L, sur un parquet dont la largeur des lattes est L ; on compte le nombre k d'aiguilles coupant les lignes parallèles de jonction entre lattes ; le quotient $2n/k$ est une valeur approchée de π. Cette méthode est très classique aussi nous n'y reviendrons pas. D'ailleurs, comme celle des coups de fusil, elle ne donnera jamais plus de quatre décimales exactes de π.

Le nombre de chocs avec deux billes et un mur

Plus intéressante et surprenante est la méthode physique proposée par Gregory Galperin, de l'université de l'Illinois. Elle n'utilise que des chocs entre billes qui suivent les lois de la physique classique et produisent les décimales de π les unes après les autres. Non seulement le dispositif imaginé donne π, mais il le donne écrit en base 10, et cela sans qu'aucun calculateur mécanique ou électronique ne soit mêlé à l'affaire.

Par rapport à celle de Buffon et du fusil, la méthode de Galperin a l'avantage que le hasard n'intervient pas et que le procédé déterministe de calcul de π donne donc, non pas une approximation de π, mais exactement les premiers chiffres de π... pour

Calculer π par des moyens physiques insoupçonnés

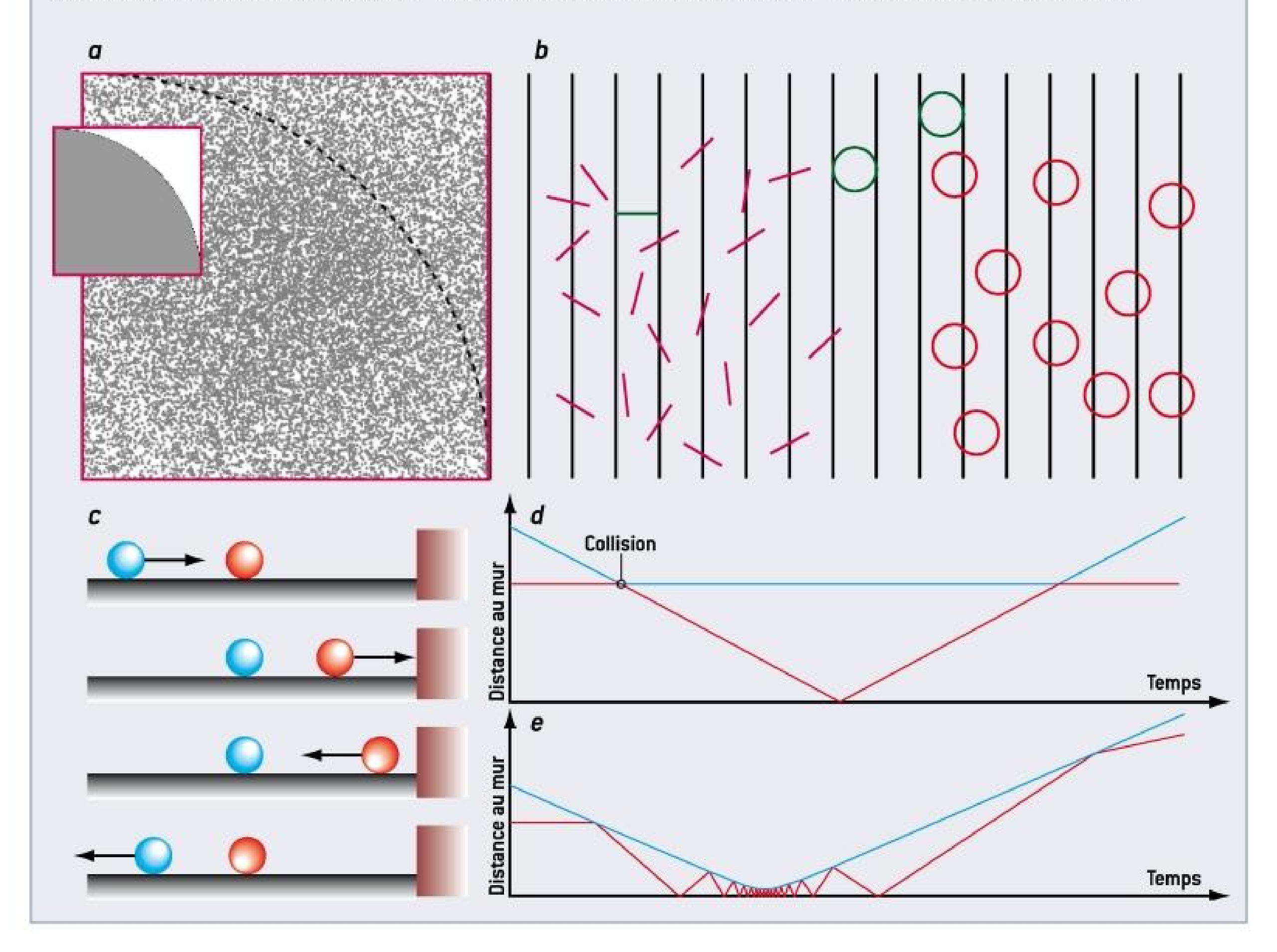
En comptant les points ou grains de sable supposés uniformément étalés sur un quart de disque inscrit dans un carré *(a)*, et en faisant le rapport entre le nombre obtenu et le nombre total de grains de sable dans le carré, on obtient une valeur approchée de π/4. Lorsque les points sont choisis par des méthodes numériques (en utilisant par exemple des générateurs de nombres pseudoaléatoires), on parle de méthode de Monte-Carlo.

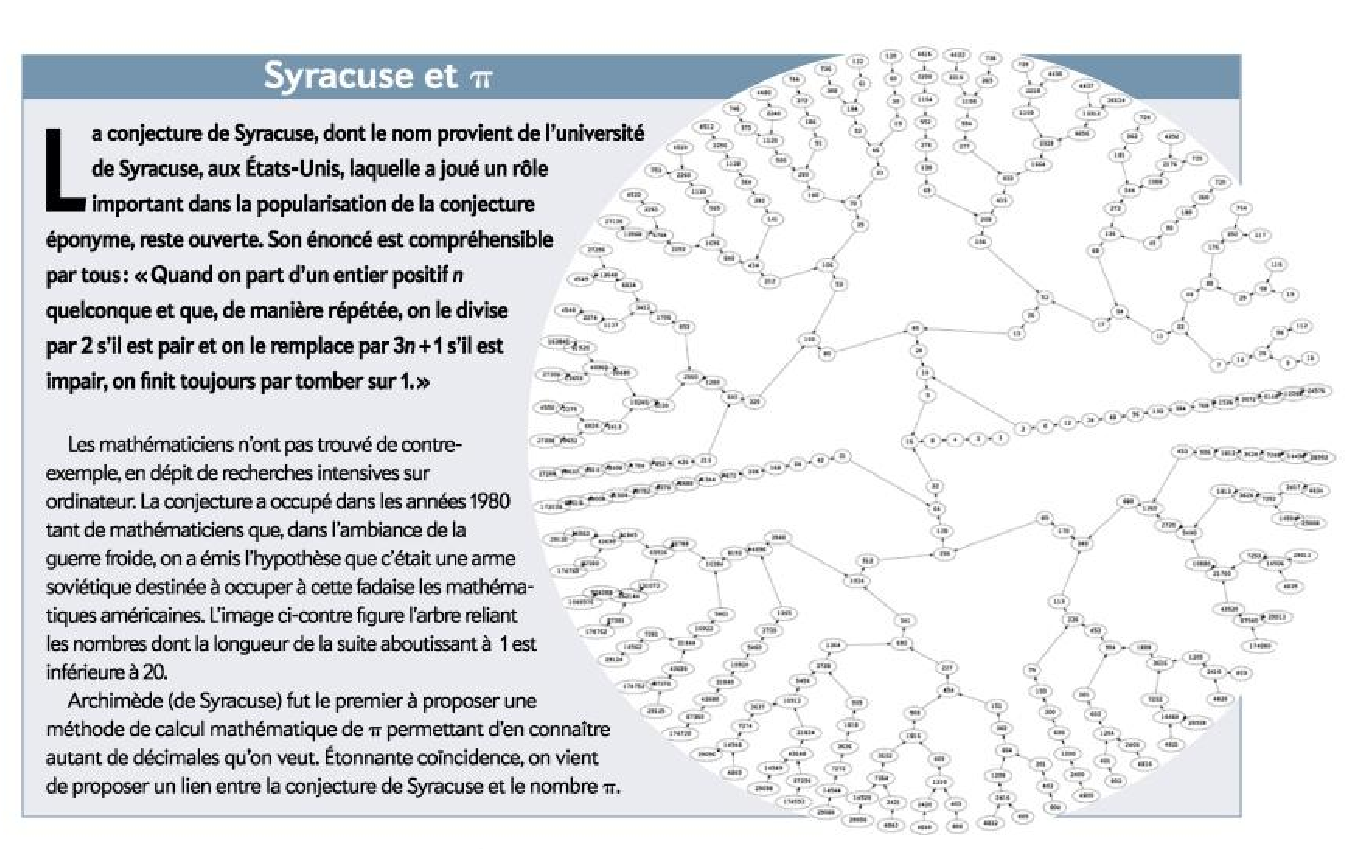
Si la répartition des points n'est pas uniforme, la méthode ne marche plus : il faut opérer un ajustement statistique. Vincent Dumoulin et Félix Thouin, plutôt que des grains de sable, ont tiré au fusil sur une cible. Le résultat de ce calcul agressif de π est 3,131.

Une deuxième méthode *(b)* est la méthode du naturaliste Buffon. Si on lance une aiguille aléatoirement sur un tracé constitué de droites parallèles espacées de la longueur L d'une aiguille, la probabilité de l'intersection d'une aiguille avec une droite est $2/\pi$: en lançant beaucoup d'aiguilles et en comptant la proportion d'intersections, on en tire une approximation de π. Afin de comprendre cela, supposons que, en moyenne, le nombre de points d'intersection d'une courbe quelconque avec les droites soit proportionnel à sa longueur. Pour un cercle de diamètre L, ce nombre est toujours égal à 2 ; alors le nombre de points d'intersection pour l'aiguille sera en moyenne $2L/\pi L = 2/\pi$.

Une troisième méthode exploite les chocs entre billes. Prenons une bille bleue et une bille rouge de même masse *(c)*. La bille rouge est immobile. La bille bleue la frappe selon un choc élastique. La bille bleue s'immobilise et la bille rouge se trouve précipitée sur un mur où elle rebondit et repart vers la bille bleue. Après le choc, la bille rouge est à nouveau immobile et la bille bleue s'éloigne indéfiniment. Il y a eu 3 chocs : 3 est le premier chiffre de π *(d)*.

Si les masses sont dans un rapport 100, au lieu de 3 chocs, il y en a 31 *(e)*. Plus généralement, Gregory Galperin a prouvé que si le rapport des masses est 100^n, alors le nombre de chocs reste fini, et c'est l'entier correspondant aux $n+1$ premières décimales de π. Ainsi, pour $n = 5$, on aura 314 159 chocs : ce sont les 6 premiers chiffres de π.





Syracuse et π

La conjecture de Syracuse, dont le nom provient de l'université de Syracuse, aux États-Unis, laquelle a joué un rôle important dans la popularisation de la conjecture éponyme, reste ouverte. Son énoncé est compréhensible par tous : « Quand on part d'un entier positif *n* quelconque et que, de manière répétée, on le divise par 2 s'il est pair et on le remplace par 3*n* + 1 s'il est impair, on finit toujours par tomber sur 1. »

Les mathématiciens n'ont pas trouvé de contre-exemple, en dépit de recherches intensives sur ordinateur. La conjecture a occupé dans les années 1980 tant de mathématiciens que, dans l'ambiance de la guerre froide, on a émis l'hypothèse que c'était une arme soviétique destinée à occuper à cette fadaise les mathématiques américaines. L'image ci-contre figure l'arbre reliant les nombres dont la longueur de la suite aboutissant à 1 est inférieure à 20.

Archimède (de Syracuse) fut le premier à proposer une méthode de calcul mathématique de π permettant d'en connaître autant de décimales qu'on veut. Étonnante coïncidence, on vient de proposer un lien entre la conjecture de Syracuse et le nombre π.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Collatz-graph-20-iterations.svg

peu que le dispositif matériel soit exactement conforme au modèle théorique.

Pour comprendre cette méthode, commençons par le cas le plus simple. On considère deux billes A et B de même masse exactement (en fait, des masses ponctuelles, la rondeur des billes ne joue aucun rôle). La bille A est immobile à une distance *L* d'un mur plat M. On lance la bille B perpendiculairement au mur M dans la direction de A. Elle cogne la bille A de façon parfaitement élastique (conservation de l'énergie cinétique et de la quantité de mouvement). La bille B s'immobilise donc, et A part vers le mur M avec la vitesse qu'avait B et qu'elle lui a transmise. La bille A cogne le mur. On suppose à nouveau que le choc est parfaitement élastique. Elle rebondit, et repart vers B, toujours avec la même vitesse. La bille A cogne B, A s'immobilise et B repart en s'éloignant du mur indéfiniment. On suppose qu'il n'y a pas de frottement. Il y a eu trois chocs : deux entre les billes A et B et un entre la bille A et le mur. Le chiffre 3 est le premier de π. Ce n'est pas un hasard !

Si maintenant on refait l'expérience avec une bille B dont la masse est 100 fois celle de A (toujours en supposant des chocs parfaitement élastiques), le schéma des collisions est plus compliqué. Avant que B et A ne se séparent définitivement, le nombre de chocs entre A et B et de la bille A avec le mur est 31. Ce sont les deux premiers chiffres décimaux de π. Plus généralement, si le rapport des masses entre B et A est 10^{2n}, alors le nombre de chocs donnera exactement les $n+1$ premiers chiffres décimaux de π. Ainsi, pour un rapport de masse de 10 000, il y a 314 chocs ; pour un rapport 1 000 000, il y a 3 141 chocs ; etc.

Une belle méthode, mais sans intérêt pratique

Pour les premières valeurs de *n*, on peut écrire de petits programmes qui confirment les affirmations indiquées. Le résultat général est cependant démontré de manière parfaitement rigoureuse *(voir la bibliographie)*. Il nécessite juste une petite hypothèse : les $2n$ premiers chiffres de π ne doivent pas se terminer par $n-1$ fois le chiffre 9. On sait que c'est vrai pour *n* plus petit que 6 650 000 000 000, puisqu'on connaît explicitement les décimales de π, mais pour *n* tendant vers l'infini, nul ne sait le démontrer. Cette propriété est jugée plus que probable, mais elle reste inaccessible à nos techniques de preuve.

La méthode est magnifique et a étonné les spécialistes des systèmes dynamiques, qui n'imaginaient pas que π soit présent dans des dispositifs aussi élémentaires.

Sur le plan pratique, la méthode est cependant d'un intérêt limité. Comment ajuster les masses de A et de B avec la précision exigée ? On ne peut espérer faire beaucoup plus que le nombre d'Avogadro, soit environ 10^{24}, ce qui ne donnera que 12 décimales, et les autres mesures sont à l'avenant. Comment être certain de lancer les billes perpendiculairement au mur avec toute l'exactitude nécessaire ? Comment s'assurer que les chocs soient parfaitement élastiques et qu'il n'y ait aucun frottement ?

Pas plus que la méthode de Buffon ou du fusil, dont on ne tire jamais plus de quatre décimales de π, on ne tirera pas de celle de Galperin un grand nombre de chiffres

de π. Si l'on veut s'en tenir à des méthodes physiques, le mieux est peut-être simplement de mesurer avec soin le périmètre et le diamètre d'un cercle assez grand et de faire le quotient. En réalité, rien ne vaut les calculs purs ne s'appuyant pas sur des hypothèses et des mesures physiques qu'on ne parvient jamais à mener avec plus de quelques chiffres significatifs. Venons-en donc aux méthodes mathématiques.

Nombre d'Archimède et conjecture de Syracuse

Le nombre π, dont Archimède a été le premier à proposer une méthode mathématique permettant d'en calculer les chiffres aussi loin qu'on le souhaite, porte parfois le nom de constante d'Archimède. Archimède est né, a vécu et est mort à Syracuse, en Sicile. En mathématiques, Syracuse est aussi le nom d'une conjecture qui intéresse beaucoup de monde à cause de sa simplicité.

Décrivons cette « conjecture de Syracuse » ou « conjecture de Collatz ». On part d'un entier positif quelconque n ; s'il est pair, on le divise par 2 ; s'il est impair, on le remplace par $3n+1$. Et on recommence. Par exemple, de $n = 13$ on passe à 40, puis à 20, 10, 5, 16, 8, 4, 2 et enfin 1. La conjecture affirme que quel que soit l'entier initial n, on finit toujours par arriver à 1. Personne n'a su la démontrer. Expérimentalement, elle a été vérifiée jusqu'à $2^{60} = 1,15 \times 10^{18}$. *A priori*, elle n'a rien à voir avec π, malgré son nom qui semble établir un lien avec Archimède. La Syracuse qui intervient dans le nom de la conjecture est en fait la ville américaine de Syracuse, dans l'État de New York, dont l'université a été une étape importante dans la diffusion de la conjecture au monde entier.

Une question naturelle se pose cependant : si π est vraiment partout, n'existe-t-il pas un moyen de le calculer à partir de la conjecture de Syracuse ? La réponse est oui. Le Français Roland Yéléhada a en effet mis au point une méthode de calcul de π à partir de la conjecture de Syracuse.

Le principe est le suivant. On calcule la suite de Syracuse pour tous les nombres jusqu'à une certaine borne n, par exemple 100. Pour chacune des suites calculées, par exemple [13, 40, 20, 10, 5, 16, 8, 4, 2, 1], on évalue la longueur, ici 10, et la somme des éléments de la suite, ici 119. On teste si les deux nombres obtenus ont un diviseur commun plus grand que 1 ; ce n'est ici pas le cas. On prend alors le nombre a de fois où la réponse a été NON, puis on divise a par n, ce qui donne un nombre b. On calcule enfin la racine carrée de $6/b = c$. Ce nombre c est une valeur approchée de π.

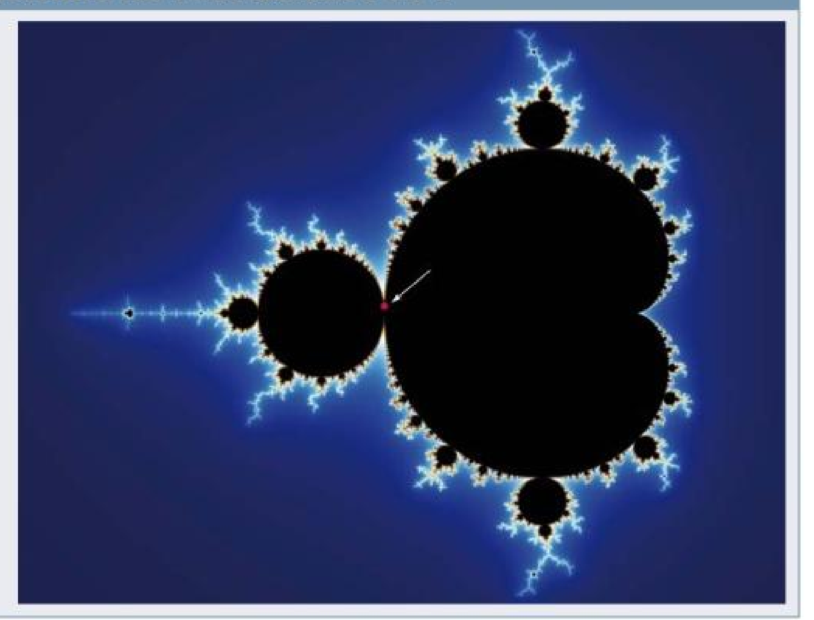
La méthode ne donne pas très rapidement les chiffres de π, mais on a des raisons de croire qu'elle converge vers π, car la longueur et la somme d'une suite de Syracuse, à cause de comportements imprévisibles des suites, sont comme deux nombres entiers tirés au hasard. Or on sait, d'après un résultat de 1881 démontré par Ernesto Cesaro, que la probabilité que deux entiers tirés au hasard n'aient pas de diviseur commun supérieur à 1 est $6/\pi^2$. Bien qu'aujourd'hui aucune preuve mathématique rigoureuse n'ait été donnée du résultat quand n tend vers l'infini, les expériences effectuées en écrivant de petits programmes confirment qu'il s'agit bien d'une méthode de calcul de π. Pour $n = 100$, on obtient $a = 66$, $b = 0,66$, $c = 3,01511...$ Pour $n = 1\,000$, on obtient $a = 606$, $b = 0,606$, $c = 3,146583...$

Bien évidemment, il s'agit d'un jeu et pour disposer de beaucoup de décimales de π, ce procédé n'est pas à recommander,

L'ensemble de Mandelbrot et π

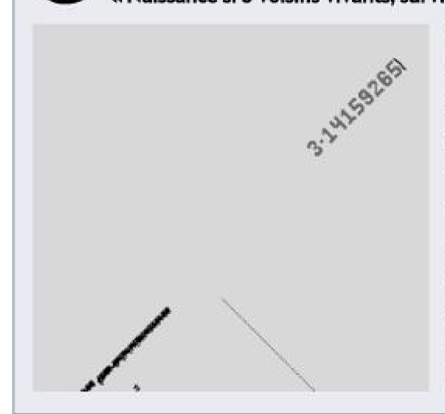
On part d'un point c (marqué en rouge) de coordonnées $(-3/4, 1/10^k)$ et on applique la règle $c_{n+1} = c_n^2 + c$ jusqu'à sortir du disque de rayon 2. Les coordonnées du « carré » c^2 du point $c = (a, b)$ sont, par définition, $(a^2 - b^2, 2ab)$.

Le nombre d'étapes nécessaires est 3 pour $k=0$; 33 pour $k=1$; 315 pour $k=2$; 3143 pour $k=3$; 31417 pour $k=4$; 314160 pour $k=5$; 3141593 pour $k=6$. On reconnaît (à l'exception des derniers chiffres) le développement décimal de π. La preuve précise que ces calculs des chiffres de π se poursuivent jusqu'à l'infini n'a été donnée qu'en 2001, par Aaron Klebanoff aux États-Unis : π est caché de manière inattendue dans l'ensemble fractal de Mandelbrot, qui est l'ensemble des points c ne s'échappant pas à l'infini.



Le jeu de la vie et π

Une fantastique configuration des cellules du jeu de la vie a été conçue par Adam Goucher. En respectant la règle unique de fonctionnement « Naissance si 3 voisins vivants, survie si 2 ou 3 voisins vivants », elle calcule π. Bien plus surprenant, elle écrit en diagonale le résultat sous la forme d'une configuration stable qui énumère les chiffres décimaux de π. On ne peut pas ici faire apparaître les détails de son million et quelque de cellules vivantes, mais vous pouvez la télécharger (http://bit.ly/1S7PwJw) et la faire fonctionner avec le logiciel gratuit Golly (http://golly.sourceforge.net).



pas plus que les méthodes de Buffon, du fusil ou de Galperin.

Voici à présent une méthode toute aussi étonnante que les précédentes, mais plus simple encore à mettre en œuvre et qui, elle, pourra plus rapidement donner jusqu'à 5 ou 6 décimales de π.

Caché dans une figure fractale

L'ensemble de Mandelbrot est la plus célèbre des fractales *(voir l'encadré page 81)*. Sa définition, succincte, tient en quelques mots : c'est l'ensemble des points c du plan complexe tels que la suite $c_0 = 0$, $c_1 = c$, $c_2 = c_1^2 + c, \ldots, c_{n+1} = c_n^2 + c, \ldots$ reste dans une partie bornée du plan ; autrement dit, c'est l'ensemble des points c tels que la distance de c_n à 0 ne tend pas vers l'infini quand n tend vers l'infini.

Si vous n'avez jamais entendu parler du « plan complexe », il suffit, pour comprendre tout ce qui nous occupe ici, de savoir que le carré d'un point de coordonnées (a, b) (représentant le nombre complexe $c = a + ib$) dans le plan complexe est le point de coordonnées $(a^2 - b^2, 2ab)$.

Les outils nécessaires à la visualisation de l'ensemble de Mandelbrot, et surtout les puissances de calcul suffisantes (en chaque point il faut calculer la suite c_n), ne sont devenus disponibles qu'au début des années 1980. Grâce à quoi on a pris conscience de la richesse de cet ensemble et du découpage infiniment fin de sa frontière. Adrien Douady, de l'université Paris-Sud, et John Hubbard, de l'université Cornell aux États-Unis, ont montré en 1981 que cet ensemble est connexe, c'est-à-dire d'un seul tenant : on peut passer d'un point à un autre de l'ensemble en utilisant un chemin qui y reste tout le temps.

En 1991, Dave Boll, étudiant en informatique à l'université d'État du Colorado, explore l'ensemble de Mandelbrot et tente de savoir si un point unique sépare la partie de cet ensemble à droite du point $c = (-3/4, 0)$ de la partie qui se trouve à sa gauche. Il prend donc des valeurs de c de plus en plus proches du point $(-3/4, 0)$ et calcule combien de points de la suite il faut considérer avant que c_n sorte du cercle de rayon 2. On sait en effet que dès que la suite c_n sort de ce cercle, elle part inévitablement à l'infini.

Il essaie donc comme point de départ $c = (-3/4, 1)$ et trouve que 3 itérations suffisent pour que la suite sorte du cercle. Il essaie $c = (-3/4, 1/10)$, il en faut maintenant 33. Avec $c = (-3/4, 1/100)$, il en faut 315. Avec $c = (-3/4, 1/1\,000)$, il en faut 3 143. Avec $c = (-3/4, 1/10\,000)$, il en faut 31 417. Avec $c = (-3/4, 1/100\,000)$, il en faut 314 160. Avec $c = (-3/4, 1/1\,000\,000)$, il en faut 3 141 593. Etc.

Stupéfaction ! Les chiffres des nombres calculés sont, à l'exception des derniers, ceux de π écrit en base 10 : 314159... Les calculs à programmer si vous voulez contrôler les affirmations mentionnées sont particulièrement simples. Pour chaque entier k à partir de zéro, définissez la suite de couples de nombres réels (a_n, b_n) :
$a_0 = 0, b_0 = 0, a_1 = -3/4, b_1 = 1/10^k$,
$a_{n+1} = a_n^2 - b_n^2 - 3/4, b_{n+1} = 2a_n b_n + 1/10^k$
et déterminez le premier n tel que $a_n^2 + b_n^2$ soit supérieur à 4. Les nombres n calculés seront les nombres 3, 33, 315, 3 143, 31 417, 314 160, 3 141 593, etc.

David Boll découvre aussi que, partant de $(1/4 + c, 0)$ et en prenant des valeurs de c de plus en plus petites (cette fois, il commence par $c = 1/100$ et divise par 100 à chaque nouvel essai), on tombe sur les entiers suivants : 30, 312, 3 140, 31 414, 314 157, etc. À nouveau, c'est π !

Notons que rien, dans la définition de l'ensemble de Mandelbrot, n'a de rapport avec la géométrie du cercle. Pourtant, une simple itération partant d'un nombre choisi de plus en plus petit donne assez rapidement des décimales de π.

Notons aussi que, par cette méthode, calculer 20 décimales de π demanderait plus de 10^{20} itérations, ce qui est la limite de ce qu'on peut espérer faire aujourd'hui, même en mobilisant les plus puissants ordinateurs. Cette méthode, aussi simple et élégante qu'elle soit, ne peut donc pas rivaliser avec les meilleures méthodes connues de calcul de π (mentionnées au tout début de cet article), qui sont plus compliquées mais beaucoup plus efficaces.

Écrit en diagonale par le jeu de la vie

Un exploit de calcul d'une autre nature concernant π est lié au célèbre « jeu de la vie » de John Conway. Ce réseau d'automates cellulaires est l'un des moyens les plus élémentaires de mener des calculs. Chaque case du plan infini, muni d'un

quadrillage, est occupée par un microcalculateur qui ne fait qu'une seule chose extrêmement simple :

– Si, à l'instant t, il est dans l'état mort (représenté par la couleur blanche), alors le microcalculateur examine ses 8 voisins ; si 3 exactement sont vivants, il passe dans l'état vivant à l'instant $t+1$; sinon, il reste dans l'état mort.

– Si, à l'instant t, il est dans l'état vivant (représenté par la couleur noire), alors le microcalculateur examine ses 8 voisins ; si 2 ou 3 sont dans l'état vivant, le calculateur reste dans l'état vivant à l'instant $t+1$; sinon, il meurt. En résumé : « Naissance si 3 voisins vivants, survie si 2 ou 3 ».

Le pouvoir de calcul d'un tel réseau est bien supérieur à ce que l'on peut imaginer, et d'ailleurs John Conway a montré qu'on pouvait calculer avec cet automate cellulaire tout ce qui est calculable par algorithme. Pour cela, il faut placer au départ la bonne configuration et ne pas être pressé !

En 2010, Adam Goucher, prenant au sérieux le résultat théorique de John Conway, a conçu une configuration du jeu de la vie comportant 1 389 325 cases vivantes. En évoluant génération après génération, la configuration calcule les chiffres de π écrit en base 10 et, c'est le plus étonnant, va les écrire en diagonale à l'aide de cases vivantes déposées qui dessinent les chiffres en écriture habituelle.

L'exploit est inouï, mais, une fois encore, c'est un jeu : au bout de plusieurs heures de fonctionnement avec mon ordinateur, la configuration d'Adam Goucher a réussi à écrire 3,14159265. L'obtention d'autres décimales demanderait des jours ou des semaines. Le calcul utilise un produit infini et progresse en $O(n^6)$, ce qui veut dire que s'il faut k heures de calcul pour avoir n décimales, en avoir le double demandera $2^6 = 64$ fois plus de temps (et cela à la condition que la mémoire disponible sur l'ordinateur ne fasse pas défaut).

Pour terminer, signalons deux méthodes illusoires de calcul de π, parfois présentées comme sérieuses, mais qui en réalité ne vous donneront jamais rien.

La première pourrait être qualifiée de géographique. Dans un article publié dans la revue *Science* en mars 1996, Hans-Henrik Stølum, de l'université de Cambridge, décrit un modèle d'écoulement des cours d'eau. Il tire de son modèle l'affirmation qu'en moyenne, le rapport entre la longueur d'un fleuve et la distance à vol d'oiseau entre la source et l'endroit où le fleuve se jette à la mer est le nombre π. En se fondant sur ce résultat, on pourrait donc tenter de calculer π en prenant un grand nombre de fleuves, et en calculant la moyenne des rapports entre leur longueur et la distance parcourue à vol d'oiseau entre la source et l'embouchure.

Malheureusement, tous ceux qui, à partir de bases de données géographiques, ont essayé arrivent à des valeurs sensiblement plus petites que π. Il semble bien que le modèle théorique soit inexact, et qu'en tout cas, pour calculer π, on ne tirera rien de la longueur des fleuves.

π n'est tout de même pas partout !

L'autre méthode illusoire est celle liée à la théorie économique de Martin Armstrong. Cet Américain est l'auteur d'une théorie (*Economic Confidence Model*) selon laquelle l'économie est soumise à des ondes cycliques tous les 8,6 ans et que les prendre en compte permet de prévoir les crises. La durée de 8,6 ans correspond à 3 141 jours, soit 1 000 π. On a du mal à comprendre ce que π, avec une précision de 4 chiffres, vient faire dans les cycles économiques, mais Martin Armstrong prétend avoir annoncé, grâce à sa théorie, la crise de 1987 au jour près.

Plus récemment, Martin Armstrong avait annoncé une nouvelle crise pour le 1er octobre 2015. Elle ne s'est pas produite ! Tout cela ne semble pas très sérieux et, si les mathématiciens sont bien persuadés de l'importance et de l'ubiquité de π, ils n'ont pas la naïveté de croire en de telles théories dont, d'ailleurs, aucune justification n'est présentée. C'est un plaisir de jouer avec π et de le découvrir partout, mais c'est avant tout un amusement qu'il est sage de ne pas transformer en superstition numérologique. ■

L'AUTEUR



J.-P. DELAHAYE est professeur émérite à l'université de Lille et chercheur au Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille (CRISTAL).

BIBLIOGRAPHIE

V. Dumoulin et F. Thouin, **A ballistic Monte Carlo approximation of π**, prépublication arXiv:1404.1499, 2014.

G. Galperin, **Playing pool with π (the number π from a billiard point of view)**, *Regular and Chaotic Dynamics*, vol. 8(4), pp. 375-394, 2003.

A. Klebanoff, **π in the Mandelbrot set**, *Fractals*, vol. 9(4), pp. 393-402, 2001.

H.-H. Stølum, **River meandering as a self-organization process**, *Science*, vol. 271, pp. 1710-1713, 1996.

SUR LE WEB

Dessin animé montrant les 31 chocs de deux billes dont le rapport des masses est 100, 2016 : https://www.youtube.com/watch?v=4UhPTrHlprk

Wikipédia, **Aiguille de Buffon**, consulté en 2016 : https://fr.wikipedia.org/wiki/Aiguille_de_Buffon



Retrouvez la rubrique Logique & calcul sur www.pourlascience.fr

SCIENCE & FICTION

Tout l'Univers sur le dos

Conjuguant lenteur et longévité, dotées d'une étrange carapace, les tortues sont des animaux atypiques. Elles stimulent l'imagination et occupent une place centrale dans certaines mythologies.

Jean-Sébastien STEYER et Roland LEHOUCQ **Illustration : Marc BOULAY**

La tortue est aux reptiles ce que le paresseux est aux mammifères. Bien avant les *Fables de La Fontaine* (1668), elle symbolisait la lenteur, mais aussi l'endurance et la perspicacité. Véritable animal-totem, la tortue est sacrée depuis l'Antiquité. Si, pour nous, elle semble porter péniblement sa maison sur son dos (sa carapace peut atteindre 70 % de sa masse corporelle totale), dans la cosmogonie chinoise la tortue supporte tout l'Univers. On observe une symbolique similaire dans la mythologie indienne, où le monde est porté par quatre éléphants géants, eux-mêmes soutenus par une énorme tortue terrestre. L'écrivain de *fantasy* humoristique Terry Pratchett (1948-2015) a d'ailleurs repris cette idée dans son Disque-monde, monde plat et circulaire porté par la Grande A'Tuin, tortue marine géante naviguant dans le cosmos *(ci-contre)* – et portant le nom très scientifique de *Chelys galactica* !

Dans la réalité, les tortues (ou testudines) constituent un groupe particulier de reptiles quadrupèdes et ovipares nommés chéloniens. Les spécialistes en ont recensé 332 espèces, terrestres ou aquatiques. Sur le plan anatomique, les chéloniens sont caractérisés notamment par un crâne fermé, sans fenêtre temporale, un bec coupant et une carapace plus ou moins ossifiée – elle demeure très souple par exemple chez *Malacochersus tornieri*, tortue terrestre capable de se glisser dans des petites anfractuosités ! Cette carapace se compose de deux éléments principaux, le plastron sur le ventre et la dossière au-dessus. Elle forme une sorte d'abri à température plus ou moins constante constitué de plaques osseuses (nommées ostéodermes) issues des côtes, de cartilage et recouverte d'écailles en kératine ou d'un cuir (chez les tortues marines ou d'eau douce).

Avec le film *Les Tortues Ninja 2* (2016, Dave Green), les chéloniens reviennent en force sur nos écrans : ces héros préférés des adolescents étaient à l'origine des personnages loufoques de bande dessinée, imaginés par Kevin Eastman et Peter Laid en 1983 pour parodier les très sérieux superhéros américains. Le mélange des genres, où les reptiles les plus lents deviennent agiles et experts en arts martiaux, a rapidement remporté un vif succès. Notons que ces tortues mutantes, bipèdes et présentant des dents ainsi qu'un nombre réduit de doigts, sont anthropoïdes.

D'autres tortues anthropomorphes, mais moins sympathiques, peuplent aussi l'imaginaire japonais : c'est le cas de Bowser, tortue jaune aux cheveux rouges et adversaire de Mario dans le jeu vidéo, ou encore de Gamera de la série éponyme, horrible



LA GRANDE A'TUIN est une tortue portant sur son dos quatre éléphants qui soutiennent le Disque-monde. Cet univers, imaginé par Terry Pratchett et illustré par Josh Kirby, est le théâtre des aventures de personnages hauts en couleur tels que Rincevent ou Mémé Ciredutemps.


LA TORTUE *ARCHELON* est la plus grande de son groupe. Elle a disparu il y a environ 80 millions d'années et mesurait près de 4 mètres de long pour 5 mètres d'envergure.

kaiju (monstre géant généralement mutant) muni de défenses et capable de voler. Ces tortues fantastiques ont une carapace très ornementée et crachent même du feu !

Un autre personnage récemment rencontré dans le dernier *Star Wars* (*Épisode VII, le Réveil de la Force*, J.J. Abrams, 2015) présente aussi certains attributs de chéloniens : il s'agit de Maz Katana, vieille amie de Han Solo qui tient une taverne sur la planète Takodana. L'absence de nez proéminent, ses yeux de petite taille, sa bouche pincée, sa peau fine, plissée et orange la rapprochent en effet de *Terrapene carolina*, petite tortue nord-américaine et mexicaine mieux connue sous le nom de « tortue boîte » ou « tortue tabatière ».

Certes, Maz Katana ne présente pas de carapace, mais sa longévité (plus de 1 000 ans, contre 800 à 900 pour maître Yoda) rappelle aussi celle des tortues : l'espérance de vie maximale d'une tortue sauvage est estimée à environ 150 ans, comme le suggère « Georges le Solitaire », célèbre tortue mâle des Galápagos (*Chelonoidis nigra*) décédée à plus de 100 ans.

Cette longévité, ainsi que leurs mouvements très lents, confère aux tortues une apparente nonchalance, comme si elles avaient toute l'éternité devant elles. Elles sont synonymes de sagesse dans de nombreuses cultures traditionnelles, par exemple en Australie, au Vietnam ou en Chine – où de très vieux idéogrammes ont été découverts gravés sur d'anciens plastrons de tortues. Entre art et mythologie, un étrange reptile légendaire muni de six yeux et d'une carapace très ornementée vivrait caché dans le désert du Taklamakan, à l'ouest de la Chine. Le plasticien Jamel Zeddam, alias Monsieur Z, a inventé et sculpté cette tortue mystique dont les trois paires d'yeux lui permettent de voir les trois temps de la vie : le passé, le présent et le futur.

Un record de taille

Tout aussi fictive, dans le film *Le Monstre des Bermudes* (Tom Kotani, 1978), une tortue marine, victime d'une mutation, devient un monstre géant. Ce scénario emprunté à la cryptozoologie rappelle que des organismes à sang froid et à croissance continue peuvent atteindre des tailles considérables, surtout lorsqu'ils sont aquatiques. Les chéloniens n'échappent pas à la règle, puisque le record est actuellement détenu par une tortue luth (tortue marine cuirassée ou *Dermochelys coriacea*) mâle retrouvée échouée sur une plage britannique en 1988, longue d'environ 3 mètres pour 914 kilogrammes – le spécimen naturalisé est exposé au Muséum national de Cardiff.

Ces mensurations restent cependant modestes comparées à celles d'*Archelon ischyros*, autre tortue marine (*voir l'illustration ci-dessus*) mais disparue il y a environ 80 millions d'années : des fossiles de ce monstre de près de 4 mètres de long, 5 mètres d'envergure et plus de 2 tonnes ont été découverts dans des sédiments marins du Dakota, aux États-Unis. Avec ses énormes pattes en forme de rame, *Archelon* montre que les chéloniens étaient bien diversifiés à l'époque des dinosaures.

L'évolution du groupe n'est pas récente : une des plus anciennes tortues, *Odontochelys*, a été mise au jour en Chine, dans des sédiments âgés d'environ 220 millions d'années. Cette tortue côtière adulte présente un bec muni de dents, un plastron bien ossifié mais une dossière dépourvue d'ostéodermes et composée uniquement de larges côtes fusionnées (comme chez les embryons de tortues actuelles).

Hélas, comme ses rares cousines du Trias, *Odontochelys* arbore une morphologie tellement dérivée que les paléontologues ont beaucoup de mal à rattacher le groupe à d'autres reptiles fossiles ou actuels. L'origine des tortues demeure donc un mystère. Et leur évolution n'est pas un long fleuve tranquille, les chéloniens ayant traversé plusieurs grandes extinctions (celle du Trias-Jurassique il y a environ 200 millions d'années, celle du Crétacé-Tertiaire il y a environ 66 millions d'années...). Si les tortues se rencontrent sur une bonne partie du globe, 42 % des espèces sont menacées d'extinction. Espérons qu'elles passent la sixième extinction à venir, et que l'espérance de vie du groupe soit à la mesure de celle des individus... ■

***Jean-Sébastien STEYER** est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. **Roland LEHOUCQ** est astrophysicien au CEA, à Saclay. **Marc BOULAY** est sculpteur numérique.*

ART & SCIENCE

Percer le secret des méduses

Ces animaux sont certes synonymes de piqûres cuisantes et de vacances ratées, mais ils constituent également un monde fascinant où l'élégance le dispute à l'immortalité. Ils sont aussi le reflet de nos liens avec l'environnement.

Loïc MANGIN

L'été approche à grands pas, les réservations d'hôtel et de trains sont faites, et, dans votre tête, vous y êtes déjà... Pour certains, ce sera la mer et la plage ; outre les caprices de la météo, une incertitude plane sur la réussite de leurs congés, une inconnue gélatineuse et urticante : les méduses ! Y en aura-t-il au point d'interdire toute baignade et d'entraîner une ruée vers la montagne l'année prochaine ? Plutôt que de les honnir, si nous profitions des quelques semaines qui précèdent le départ pour mieux les connaître ?

Pour ce faire, rendez-vous à l'Aquarium de Paris afin de découvrir les secrets de ces créatures qui, si elles gâchent parfois la baignade, n'en restent pas moins fascinantes. L'établissement vient en effet d'inaugurer un « Médusarium ». Il s'agit de cinq bassins où évoluent autant d'espèces de méduses. Ils sont le fruit de plusieurs mois de collaboration avec des experts scientifiques du monde entier, notamment les équipes renommées de l'aquarium de Kamo, à Tsuruoka, au Japon. Dans une ambiance bleutée mettant en valeur leur délicatesse, ils donnent l'occasion – rare – d'admirer la grâce légère de ces animaux en mouvement. Le spectacle ne doit pas faire oublier l'édification, et de nombreux outils pédagogiques sont là pour l'enrichissement des visiteurs.

On apprend ainsi que les méduses (des cnidaires) sont apparues il y a 600 à 650 millions d'années et seraient parmi les premiers organismes multicellulaires. On en connaît aujourd'hui quelque 1 500 espèces dont les plus grosses, telle *Cyanea capillata*, mesurent plus de 2 mètres de diamètre avec des tentacules longs de 30 mètres. Les espèces privilégiées par l'Aquarium de Paris (*cliché* c) sont plus petites...

Les relations avec l'environnement ont une place de choix. Par exemple, on est alerté sur les dangers de la gélification – une importante pullulation des méduses qui fait de la mer une masse... gélatineuse. Les causes sont multiples et mal connues : on incrimine le réchauffement climatique, la surexploitation des ressources océaniques, la pollution...

> ***Turritopsis nutricula*** **peut retrouver sa forme juvénile après avoir atteint sa maturité sexuelle : elle est immortelle.**

L'Aquarium de Paris célèbre l'ouverture de son Médusarium en proposant jusqu'au 30 juin 2016 deux expositions autour des méduses. D'abord, l'artiste israélien Micha Laury montre *Jellyfish* (« méduse » en anglais), une installation d'envergure constituée de 29 méduses en silicone aux couleurs acidulées d'environ 2,6 mètres de longueur (*cliché* b). Le banc est suspendu dans la haute nef de l'établissement.

Michel Laury, dont plus d'une vingtaine d'œuvres figurent dans les collections du centre Georges Pompidou à Paris, s'intéresse aux paradoxes. Alors, pourquoi les méduses ? Pour l'artiste, elles sont synonymes de fascination et de répulsion, de beauté et de danger, mieux encore, de mort et d'immortalité. Ce dernier point fait référence à l'espèce *Turritopsis nutricula*, capable d'inverser son processus de vieillissement et retrouver sa forme juvénile après avoir atteint sa maturité sexuelle.

L'autre exposition est intitulée *Méduses et poètes*. Elle met en regard des reproductions de vélins de Charles-Alexandre Lesueur (1778-1846) avec des textes choisis par Jaqueline Goy, spécialiste des méduses. Ainsi, *Chrysaora hysoscella* (*figure* a) est illustrée par l'extrait d'un poème de Frédéric Tristan (prix Goncourt en 1983) tiré de son recueil *Le Bal des gorgones*.

À la fin du XVIIIe et au début du XIXe siècles, le dessinateur accompagne le naturaliste François Péron dans de nombreuses expéditions. De cette collaboration naîtra l'une des plus importantes collections d'illustrations de méduses (des animaux peu connus à cette époque). Quelques erreurs d'identification ont été réparées, et ces œuvres sont désormais le point de passage obligé pour tout étudiant s'intéressant aux méduses.

Elles sont aussi indispensables, avec le Médusarium et *Jellyfish*, à tout vacancier qui voudrait savoir à quoi tient la qualité de son séjour balnéaire : un peu de gélatine ! ■

Jellyfish **et** ***Méduses et poètes*****, jusqu'au 30 juin 2016, à l'Aquarium de Paris.**
www.cineaqua.com

Ce masque de carnaval vénitien n'en est pas un ! C'est une méduse *Chrysaora hysoscella* peinte par Charles-Alexandre Lesueur.



Jellyfish, de Micha Laury.

La méduse *Mastigias papua*.

IDÉES DE PHYSIQUE

La girafe, la paille et la pompe à piston

Pour étancher sa soif, la girafe n'aspire pas l'eau comme quand nous buvons avec une paille. Elle procède plutôt comme une pompe à refoulement.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Boire est pour nous d'une facilité déconcertante. Une gorgée d'eau dans la bouche et nous n'avons qu'à laisser faire la gravité pour que l'eau atteigne notre estomac. Tel n'est pas le cas de la plupart des quadrupèdes : lorsqu'ils boivent, leur bouche est plus basse que leur système digestif. Un cas spectaculaire est celui de la gracile girafe. Avec un garrot à plus de 3 mètres de haut et un cou de « seulement » 2 mètres (pour le mâle adulte), elle doit déjà manœuvrer avec ses jambes raides pour abaisser sa tête au niveau du point d'eau. Comment fait-elle donc pour boire, c'est-à-dire faire monter l'eau sur un dénivelé de près de 2 mètres ?

Pression et dépression

Le plus simple serait pour elle de remplir d'eau sa bouche, de relever la tête au-dessus du garrot et de laisser couler le liquide dans son œsophage. Mais avec une consommation quotidienne de 40 litres d'eau et une capacité en bouche d'environ 0,3 litre, la girafe devrait effectuer près de 130 mouvements par jour pour s'abreuver.

Outre l'énergie nécessaire, cette méthode lui poserait de sérieux problèmes de pression sanguine dans le cerveau. Le problème nous est familier lorsque nous nous redressons et nous levons brusquement : la chute de pression dans la partie supérieure du corps diminue temporairement la quantité de sang qui parvient à notre cerveau, d'où parfois un léger étourdissement ou des papillons devant les yeux. C'est sans danger, car des réactions réflexes se déclenchent et régulent la pression.

Pour la girafe, le problème est tout autre. Entre les positions haute et basse de sa tête, la différence n'est pas de quelques dizaines de centimètres, mais de près de 5 mètres. La variation de pression d'un fluide étant proportionnelle à l'élévation, cela donne une variation de pression de 500 hectopascals, soit une demi-atmosphère !

Heureusement, le système sanguin de la girafe y est adapté. Grâce à un puissant cœur de 12 kilogrammes, à un réseau de vaisseaux dilatables en dérivation du système principal au niveau de la tête et à des valves, l'animal évite l'afflux de sang dans la tête lorsqu'il la baisse et les chutes de tension excessives lorsqu'il la lève. Mais cette régulation n'est pas instantanée. Effectuer plus d'une centaine de gorgées pour se désaltérer prendrait donc trop de temps et serait trop risqué pour la girafe.

Qu'envisager d'autre ? En observant l'animal, on pourrait penser que son cou fait office de paille géante et que la girafe fait monter l'eau par aspiration. Est-ce plausible pour des hauteurs de 2 mètres ? Quand nous buvons avec une paille, le dénivelé n'est que d'une vingtaine de centimètres. Peut-on faire beaucoup mieux ?

Comme l'avait expérimenté avec des siphons le physicien italien Gasparo Berti vers 1640, l'aspiration ne peut pas faire

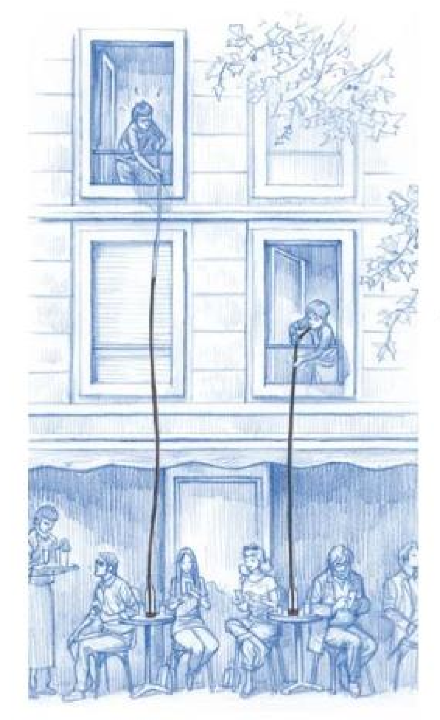
LES AUTEURS




Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique



QUAND UNE GIRAFE BOIT, sa bouche se situe à environ 2 mètres au-dessous de son système digestif. Boire par aspiration nécessiterait alors une dépression que son cou ne supporterait pas.



PEUT-ON BOIRE EN ASPIRANT avec une très longue paille ? Même si la paille est suffisamment solide pour résister à la dépression créée, on ne peut dépasser une hauteur théorique de 10 mètres et quelques (pour de l'eau), au-delà de laquelle la pression atmosphérique, à l'extrémité libre, ne peut plus compenser le poids de la colonne de liquide. En pratique, on ne dépasse guère quelques mètres.

monter l'eau plus d'une dizaine de mètres. Pourquoi ?

Si l'eau monte dans une paille ou dans un tuyau, ce n'est pas grâce à une force de traction que nous exercerions sur le liquide, mais grâce à la poussée de l'atmosphère sur sa surface libre. Lorsque nous « aspirons » un liquide avec une paille, nous réduisons la pression à l'intérieur de cette dernière. Par conséquent, le liquide monte jusqu'à ce que le poids de la colonne liquide soit compensé par la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur. Dans la situation la plus favorable, la pression à l'intérieur, en haut de la colonne de liquide, est presque nulle ; la pression atmosphérique extérieure peut alors faire monter le liquide à 10 mètres environ s'il s'agit d'eau, ou 760 millimètres s'il s'agit de mercure, plus dense.

Quelle hauteur atteint-on en pratique ? Nous avons expérimenté avec un tuyau et réussi à aspirer avec la bouche de l'eau plus basse de 2 mètres. Ce n'est déjà pas facile : il faut alterner aspiration et obturation du tuyau (pour reprendre son souffle). Estimons jusqu'où nous pouvons faire monter l'eau en déterminant la dépression créée lorsque nous inspirons avec les poumons.

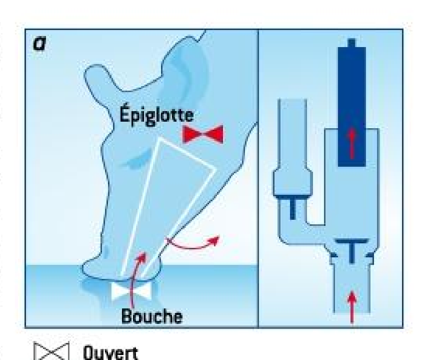
Sachant que la capacité pulmonaire totale (volume d'air maximum contenu dans nos voies aériennes) est d'environ 6 litres et que le volume résiduel (l'air restant dans les poumons lorsqu'on a soufflé à fond) est de 1,5 litre, nous pouvons en principe diminuer d'un facteur 4 la pression dans nos voies aériennes ; on en déduit que nous pouvons aspirer de l'eau jusqu'à 7,5 mètres de hauteur *(voir l'illustration ci-dessus, à gauche)*.

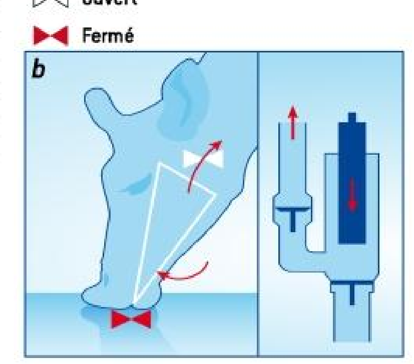
Une expérience réalisée par deux jeunes Américains pour une vidéo postée sur Youtube montre que l'un deux atteint une hauteur d'aspiration de plus de 6 mètres. Nous ne pouvons confirmer ce chiffre et invitons les lecteurs à nous faire part de leurs expériences. On peut sans doute monter plus haut, au moins pendant quelques instants, avec quelques astuces. Par exemple, on pourrait boucher le bas du tuyau, aspirer pour faire le vide à l'intérieur et relâcher d'un coup. Dans ce cas, l'eau accélérerait en s'élevant et, avec l'énergie cinétique acquise, monterait plus haut.

Une pompe qui refoule l'eau

De toute façon, les 2 mètres nécessaires pour que la girafe boive en aspirant sont largement dépassés. Est-ce ainsi qu'elle procède ? Rien n'est moins sûr. La capacité de ses poumons n'est pas en cause, mais, contrairement à l'homme, son cou est très long et il semble qu'il ne soit pas conformé pour supporter la dépression qui régnerait tout au long de la trachée.

Observons en détail une girafe en train de boire. On constate que, les lèvres plongées en permanence dans l'eau, une gorgée dure environ 25 secondes. Dans ce laps de temps, la girafe enchaîne 17 succions de 1,5 seconde dont chacune remplit d'eau sa





LE MÉCANISME AU MOYEN DUQUEL la girafe se désaltère *(schémas de gauche)* est analogue à celui d'une pompe à refoulement *(schémas de droite)*. Dans un premier temps, l'animal ouvre sa bouche, ferme son épiglotte et, par succion, remplit d'eau sa bouche *(a)*. Puis il ferme la bouche, ouvre l'épiglotte et referme sa mâchoire inférieure, ce qui pousse l'eau vers l'œsophage *(b)*. La mâchoire inférieure joue ainsi le rôle de piston, et les lèvres et l'épiglotte jouent le rôle de valves.

bouche. Comme la capacité de cette dernière est de 0,3 litre, la girafe ingère près de 5 litres d'eau, ce qui correspond peu ou prou au volume de son œsophage (5 centimètres de diamètre et un peu plus de 2 mètres de long). Autrement dit, la girafe remplit presque complètement son œsophage d'eau. Puis elle se redresse et laisse la gravité agir.

Mais comment l'eau passe-t-elle de la bouche à l'œsophage à chaque succion ? Vraisemblablement, la girafe reproduit sans le savoir le mécanisme des pompes à piston *(voir la figure page ci-contre, en bas)*. Elle bloque d'abord l'accès à l'œsophage avec son épiglotte, ouvre la bouche et la remplit d'eau en aspirant un peu. Elle ferme ensuite la bouche, rouvre l'épiglotte, bloque sa respiration et relève sa mâchoire inférieure. Ce mouvement réduit le volume de la cavité buccale et pousse ainsi l'eau dans l'œsophage. Tout cela est relativement aisé : il suffit que la bouche supporte une surpression de 0,2 atmosphère et que la mâchoire pousse un poids équivalent à 5 kilogrammes (le poids de l'eau qui remplit l'œsophage).

L'exemple de la girafe nous montre aussi comment monter de l'eau à des hauteurs supérieures à 10 mètres : au lieu d'avoir une pompe en haut qui aspire, on fait fonctionner une pompe au fond qui refoule l'eau. On peut ainsi atteindre une surpression très importante, en tout cas sans limite supérieure dictée, comme dans le cas de l'aspiration, par les lois de l'hydrostatique. C'est ce que l'on fait pour récupérer l'eau des puits profonds ou pour vider les tunnels de mine remplis d'eau. Une pompe de dénoyage typique utilisée dans une mine peut ainsi fonctionner à 16 atmosphères et refouler l'eau jusqu'à près de 150 mètres de haut ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

P.-M. Binder et D. L. Taylor, **How giraffes drink**, *The Physics Teacher*, vol. 53(9), pp. 518-520, 2015.

■ SUR LE WEB

Vidéo montrant une aspiration avec une paille sur une hauteur de 6 mètres :
www.youtube.com/watch?time_continue=343&v=HUmZrtiXDik



QUESTION AUX EXPERTS

Les plantes ont-elles des cancers ?

Les tumeurs végétales existent, mais elles sont bien différentes de celles qui affectent les animaux.

Yves Dessaux


Galles dues à Agrobacterium / ©Université de Géorgie et USDA Forest Service

Comme il y a des cancers animaux, il y a des cancers végétaux : des tumeurs, rarement fatales à la plante, peuvent se développer en quelques semaines ou quelques mois sous la forme d'un gonflement de l'organe touché et mesurer jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres. Alors que les causes de cancer connues chez l'animal sont nombreuses et diverses – radiations, substances cancérogènes, virus, bactéries... –, on sait depuis le début du XXe siècle que les cancers végétaux sont dus à des bactéries de trois genres : *Agrobacterium*, *Pseudomonas* et *Rhodococcus*.

Chez les animaux, un cancer résulte d'altérations génétiques qui entraînent la multiplication désordonnée des cellules. Ces altérations portent sur des gènes qui contrôlent le cycle cellulaire ou qui réparent l'ADN. Elles se produisent soit au moment de la réplication de la cellule, soit sous l'influence d'un agent cancérogène. Quoi qu'il en soit, la combinaison de plusieurs événements, suivie de la formation de vaisseaux sanguins, est nécessaire pour qu'une tumeur se développe.

Chez les végétaux, les processus de tumorisation sont différents, car les cellules végétales répondent à des stimuli d'organisation différents de ceux auxquels répondent les cellules animales. Un premier groupe de bactéries, des *Pseudomonas* et des *Rhodococcus*, a des gènes qui conduisent à la production d'auxines et de cytokinines, des hormones de croissance végétale. La libération d'auxine dans la plante indique aux cellules végétales de se diviser et de s'engager vers la formation de racines. Les cytokinines, elles, indiquent aux cellules de se diviser et de s'engager vers la formation de tiges feuillées. Ces deux messages contradictoires déclenchent la multiplication anarchique des cellules.

Les tumeurs dues à *Pseudomonas* sont notamment celles de la tuberculose de l'olivier ; celles dues à *Rhodococcus* apparaissent par exemple dans la maladie du balai de sorcière. Elles régressent ou se stabilisent dès que la bactérie disparaît, par exemple sous l'effet d'un bactéricide.

Des tumeurs dues à trois genres de bactéries

Il en va tout autrement dans la seconde forme de cancer végétal, celle due aux bactéries du genre *Agrobacterium*. Ces agrobactéries provoquent par exemple le broussin de vigne (une maladie grave pour les vignes jeunes) et la galle du collet (maladie affectant les dicotylédones, plantes dont la vie commence par la sortie de deux feuilles primordiales de la graine). En pépinière où sont cultivées des dicotylédones, c'est particulièrement ennuyeux et il faut éliminer les plantes contaminées.

Comment agit *Agrobacterium ?* Il modifie aussi la balance hormonale végétale, mais c'est la cellule végétale elle-même qui surproduit les hormones, et non la bactérie. Pour cela, *Agrobacterium* exporte vers le noyau de la cellule végétale visée un fragment de plasmide. Ce fragment d'ADN non chromosomique, appelé ADN-T, s'insère dans le génome de la cellule. Celle-ci se met alors à produire de l'auxine et une cytokinine, ce qui entraîne une prolifération cellulaire sans ordre ; une vascularisation s'ensuit et la tumeur commence à croître. Ainsi, une tumeur créée par *Agrobacterium* peut continuer à croître même quand la bactérie pathogène a disparu.

Un point remarquable est que l'ADN-T porte aussi des gènes qui déclenchent, aux dépens des réserves métaboliques du végétal, la synthèse de composés spécifiques des tumeurs : les opines. Or ces substances peuvent servir d'aliments aux agrobactéries à l'origine de la tumeur... Autre avantage pour *Agrobacterium,* elles favorisent le transfert de l'ADN-T depuis une bactérie pathogène vers une bactérie non pathogène. À l'aide des opines, *Agrobacterium* se ménage donc au sein de la tumeur une niche écologique favorable à la dissémination du pouvoir pathogène.

Notons pour finir que, depuis plus de trente-cinq ans, les améliorateurs végétaux mettent à profit la transformation génétique opérée par *Agrobacterium* pour obtenir des lignées végétales qui, en lieu et place des gènes de synthèse d'hormones, ont intégré des gènes d'intérêt agronomique. ■

Yves DESSAUX, directeur de recherche au CNRS, travaille à l'Institut de biologie intégrative de la cellule, à Gif-sur-Yvette.

SCIENCE & GASTRONOMIE

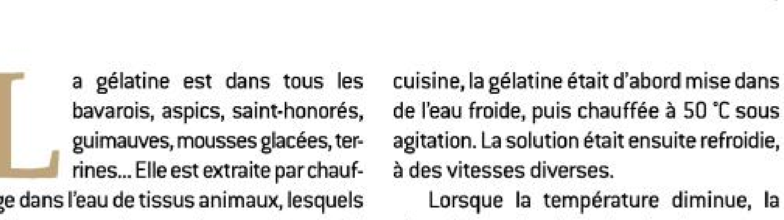
Bavarois, aspics et guimauves

La prise de la gélatine dépend de la vitesse de refroidissement, de l'acidité de la solution, de sa salinité... Des paramètres à surveiller !

Hervé THIS



© Jean-Michel Thiriet



La gélatine est dans tous les bavarois, aspics, saint-honorés, guimauves, mousses glacées, terrines... Elle est extraite par chauffage dans l'eau de tissus animaux, lesquels contiennent en plus ou moins grande quantité des protéines nommées collagènes. Les molécules de collagène sont des trimères, avec trois brins enroulés en hélice qui, chauffés dans l'eau, se séparent et se dispersent. Au refroidissement, les brins se réassocient en un réseau continu, formant un gel. À quelle température ? À quelle vitesse ? Les autres composés dissous dans l'eau modifient-ils la prise en gel ? Ces questions ont été réexplorées par Franco Bellini et ses collègues de l'université de Santa Fe, en Argentine.

La prise en gel commence rapidement, quand la température devient inférieure à... À combien, au fait ? On évoque souvent des températures de 36, ou 32, ou 40 °C... En réalité, la même solution de gélatine gélifie à des températures différentes, et après des temps différents, selon les conditions de la prise en gel, notamment la vitesse de refroidissement. Aussi les résultats donnés pour le degré Bloom (la force des gels) par l'industrie diffèrent-ils considérablement selon les méthodes de mesure utilisées.

Franco Bellini et ses collègues ont cherché à relier les déterminations quasi statiques des études précédentes aux mises en œuvre réelles. Ils ont utilisé de la gélatine de peau de bovin (à la faible concentration de 2 % en masse) et effectué leurs mesures dans un réacteur où ils pouvaient régler la température et suivre la viscosité et le pH. Comme en cuisine, la gélatine était d'abord mise dans de l'eau froide, puis chauffée à 50 °C sous agitation. La solution était ensuite refroidie, à des vitesses diverses.

Lorsque la température diminue, la viscosité croît d'abord très lentement, puis, soudain, augmente considérablement, jusqu'à devenir infinie lors de la gélification. La description des courbes expérimentales par des équations simples permet alors de définir une « température de gélification ».

Cette température diminue quand la vitesse de refroidissement augmente, car les germes de gélification doivent avoir le temps d'agir, comme les germes lors d'une cristallisation : un refroidissement rapide de l'eau conduit à de nombreux petits cristaux, d'où la consistance très onctueuse des sorbets, alors qu'un refroidissement plus lent engendre des granités, où les cristaux ont le temps de grossir. De même, la vitesse de gélification est en concurrence avec la vitesse de refroidissement, et la gélification se fait plus tard quand la température descend vite.

Par ailleurs, à vitesse de refroidissement égale, la température de gélification augmente avec le pH. Ce phénomène découle du fait que les molécules de la gélatine, formées d'enchaînements d'acides aminés, ont une charge électrique qui dépend du pH. Par conséquent, selon l'acidité de la solution, la charge électrique favorise ou non l'association en triples hélices : quand la répulsion électrique entre hélices est forte, il faut un refroidissement supérieur pour déclencher la gélification.

Enfin, une plus forte concentration en sels augmente la température de gélification aux pH très acides, et la diminue vers les pH supérieurs (faible acidité) : les sels écrantent les charges électriques, ce qui favorise la gélification quand elle est gênée par les répulsions électriques.

Comment utiliser ces résultats en cuisine ? Dans les milieux que l'on fait gélifier, tel celui d'un bavarois, la matière grasse ou l'air, respectivement sous la forme de gouttelettes émulsionnées ou de bulles d'air, interagissent peu avec la gélatine en solution. En revanche, l'acidité des purées importe : que du sucre soit dissous ou non, les fruits broyés peuvent avoir des pH très variés, atteignant parfois 2 pour des framboises, par exemple ! Dans ce cas, nous devons prévoir que la température de gélification sera plus élevée.

Par ailleurs, si la préparation gélifiée doit attendre, la gélification se poursuivra très longtemps (des semaines), ce qui augmentera la dureté de la préparation. N'ayons pas la main trop lourde sur la gélatine ! ■



Hervé THIS, physicochimiste, est directeur du Centre international de gastronomie moléculaire AgroParisTech-Inra et directeur scientifique de la fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr

■ MATHÉMATIQUES

Alexandre Grothendieck

Philippe Douroux

Allary, 2016
(250 pages, 18,90 euros).

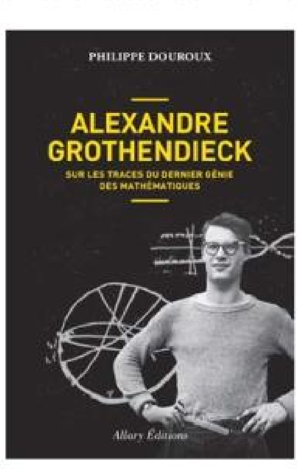
L'effort est louable: retranscrire la vie picaresque et dramatique du génie des mathématiques que fut Alexandre Grothendieck, un homme «plus grand que nature». En dépit d'une traque persévérante de quatre ans, l'auteur n'a guère réussi à converser avec l'irascible ermite, resté enfermé dans ses désirs intolérables, même pour son propre cerveau, mais la peinture de sa vie douloureuse est poignante.

Lorsqu'il traite des concepts mathématiques avancés par Grothendieck, l'auteur se limite à des exégèses d'analogies qui n'éclairent guère la pensée complexe du grand mathématicien. Certaines affirmations m'ont aussi semblé outrées: ainsi cette idée présentée sur la quatrième de couverture que les recherches de Grothendieck auraient «permis [...] l'Internet»….

Le principal intérêt du livre est dans le reste. Ainsi, la description de la folie de Grothendieck est angoissante. L'homme fait en effet partie de la longue cohorte des mathématiciens déments, dans la lignée des Gödel, Nash et Perelman, avec lesquels il partage des traits.

La création mathématique de Grothendieck est certainement plus originale que sa folie! Les mathématiciens, en quête d'absolu par l'abstraction, détachés des nécessités non axiomatisées, sont-ils souvent sujets à l'aliénation mentale? Les dénis obstinés de Grothendieck des lois sociales, son écologie radicale et intransigeante, son orgueil égoïste vis-à-vis de ses femmes et de ses enfants le font souffrir autant qu'il impose son malheur aux autres.

Par ailleurs, il est passionnant de lire l'auteur sur l'originalité de la méthode de travail de Grothendieck, visionnaire gigantesque qui donnait son travail de la nuit à des mathématiciens notoires, lesquels avaient pour tâche de débroussailler ses géniales visions... La France a donné à Grothendieck les moyens d'exprimer son talent dans la totale liberté de l'Institut des Hautes Études Scientifiques (IHES). Las! Sa démission de l'IHES pour une broutille, déclenchera sa déchéance sociale et dans une certaine mesure mathématique, bien que les milliers de pages de sa main non décryptées recèlent peut-être des richesses dormantes.



Philippe Boulanger

■ SCIENCE ET SOCIÉTÉ

Au cœur des controverses

Yannick Barthes *et al.*

Actes Sud/IHEST, 2015
(230 pages, 24,95 euros).

Qu'y a-t-il de commun entre le changement climatique, l'évolution darwinienne, les méfaits du tabac, l'existence du vide, les OGM, les déchets nucléaires, l'origine de l'Univers, le déclin des abeilles, les gaz de schiste, le concile de Nicée, les pesticides, la disparition des dinosaures? Ce sont tous des sujets de controverses qui alimentent ou ont alimenté de vifs débats.

La plupart des auteurs de cet ouvrage ont participé à une université d'été organisée par l'Institut des hautes études pour la science et la technologie (IHEST). Cet établissement public à caractère administratif accueille en effet chaque année une promotion de 45 auditeurs nommés par arrêté ministériel, afin de susciter un débat public autour de l'impact du progrès scientifique et technologique sur la société. En conséquence, ce livre, qui rassemble les différentes interventions, a les qualités et les défauts de ce genre d'exercice: présenter des avis qualifiés dans divers domaines de compétence en laissant au lecteur le soin de faire la synthèse.

Cet ouvrage collectif ne tente pas de faire le résumé des connaissances sur ces polémiques ni même sur le phénomène de la controverse, mais de clarifier ses différents usages en donnant des exemples concrets. Certains n'ont qu'une valeur historique, mais permettent d'analyser les différents types de débats; beaucoup sont actuels et nous interpellent.

Une controverse illustre plusieurs articles: celle du darwinisme. Elle m'a le plus intéressé puisque j'ai commis un livre sur le sujet. S'agissant de ce thème majeur et encore polémique, les auteurs montrent bien que la fonction la plus évidente de la controverse, qui est de faire avancer la connaissance en clarifiant les idées et en apportant des données nouvelles, est parfois dévoyée pour défendre des convictions inébranlables. Ainsi, insister sur le côté controversé en parlant de «théorie» de l'évolution est contre productif: cela relève à mon avis davantage de la dévalorisation que de la discussion. Il n'existe en effet aucune théorie scientifique alternative pour expliquer la biodiversité; elle a par ailleurs été confirmée des milliers de fois depuis 150 ans, ce qui en fait l'une des théories les mieux éprouvées de toute la science… Passer du créationnisme biblique incapable d'expliquer les données paléontologiques au «dessein intelligent», qui considère l'évolution darwinienne comme l'expression d'un plan divin, est respectable comme tout point de vue, mais le présenter comme une théorie alternative est pour moi davantage une adaptation idéologique qu'une volonté sincère d'avancer dans l'étude de la réalité. Ainsi, le fait que les écoles de certains États pratiquent l'enseignement du créationnisme pour «contrebalancer» celui du darwinisme vise clairement à donner un statut scientifique à une croyance.

Pierre Jouventin
Directeur de recherche émérite, CNRS, Montpellier

■ MÉDECINE

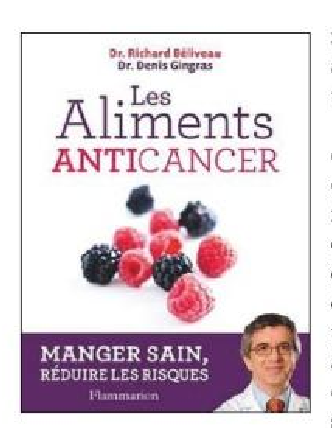
Les Aliments anticancer

Richard Béliveau et Denis Gingras

Flammarion, 2016
(256 pages, 19,90 euros).

Médecins au sein de la chaire Prévention et traitement du cancer de l'université du Québec à Montréal, les auteurs nous introduisent dans le monde complexe de la cancérogenèse et de sa prévention par l'alimentation quotidienne.

Au fil de ce bel ouvrage de vulgarisation abondamment illustré, ils nous entraînent vite dans l'intimité de la cellule et des tissus, en déroulant la mécanique complexe des différentes étapes de la cancérogenèse, tout en en soulignant l'hétérogénéité et l'interdépendance



des facteurs impliqués dans ces processus. Ceux-ci conduiront, dans un contexte inflammatoire chronique, à l'autonomisation cellulaire échappant à tout contrôle régulateur et à l'apoptose. Mais à chaque étape, quel est le rôle délétère ou réparateur de notre environnement, au sein duquel la nourriture joue une fonction essentielle ?

Les plantes, du fait de leur immobilité, ne peuvent lutter contre leurs prédateurs autrement que par l'élaboration de molécules chimiques susceptibles de les tromper, de les faire fuir ou de les éliminer. Elles fabriquent aussi des molécules capables de réparer leurs tissus. De tout temps, l'usage médicinal des plantes, afin de s'approprier ces facultés, a été une préoccupation humaine constante.

Mais dans le contexte scientifique et médical contemporain, l'utilisation alimentaire de telles molécules est-elle encore légitime ? Les auteurs nous proposent à ce propos une revue systématique des végétaux reconnus pour leurs propriétés : choux et crucifères, ail, oignons, soja, épices et aromates, thé vert, fruits rouges, tomate, agrumes… mais aussi vin rouge, chocolat et café. Au-delà de l'aspect culinaire pratique, chaque « fiche » décrit les molécules d'intérêt, donne des références bibliographiques, historiques, épidémiologiques ou relatives à des études cliniques et apporte ainsi des preuves mécanistiques et cliniques de leur efficacité.

Remettre au goût du jour des choix et des gestes simples de notre culture culinaire n'a rien de révolutionnaire. Mais c'est renforcer au quotidien les conditions d'une prévention du cancer efficace par une alimentation saine et diversifiée. C'est aussi renouer avec l'essence même de notre condition humaine de savoir s'adapter aux grands défis du moment en valorisant notre environnement.

Bernard Schmitt
CERNh, Lorient

■ **PRÉHISTOIRE**

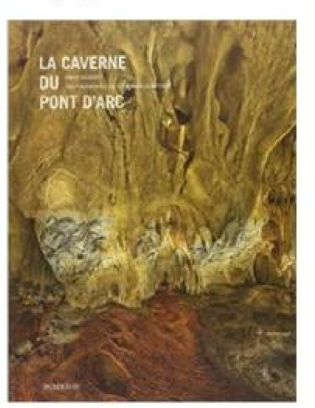
La caverne du Pont d'Arc

David Huguet et Stéphane Compoint

Actes Sud, 2015
(270 et 48 pages, 39 euros).

Ce livre et le cahier qui l'accompagne racontent par le menu comment est née et a été conçue la réplique de la grotte Chauvet. Entrepris dès 2007, ouvert en 2015, le fac-similé est l'expression de toutes les compétences et savoir-faire accumulés depuis l'ouverture de Lascaux II, en 1984. Altamira II, Ekain II, bientôt Lascaux IV… La 3D ne suffit pas. Le public a besoin de vivre l'expérience souterraine, même factice. Il lui faut une réplique en « dur ». Où placer la réplique ? Faut-il la reproduire intégralement ? Quel parcours choisir ? Quelle mise en scène privilégier ? Comment éclairer ? Autant de débats qui sont retranscrits ici.

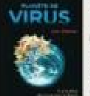
Ainsi, on a pris la décision de réduire la cavité de façon à en raccourcir les cheminements et de sélectionner certains panneaux. Des récits circonstanciés, agrémentés de témoignages intéressants sur la grotte réelle, nous expliquent les différentes étapes de ce chantier gigantesque, depuis la reconstitution numérique des volumes et des surfaces jusqu'à la reproduction des dessins et gravures, en passant par le rendu des concrétions, avec les techniques de l'époque.



Ce qui n'était au départ que prouesse technique est devenu, la magie de la caverne aidant, une entreprise fédératrice de talents, motivés par une seule idée : faire oublier la frustration de ne pouvoir visiter la vraie grotte, et faire en sorte que la copie soit aussi belle et envoûtante que son glorieux modèle. Le succès de la première saison prouve que les aventuriers ont réussi leur pari. Ils en sont fiers, et cela se sent dans l'écriture. À bientôt pour un nouveau fac-similé ?

Romain Pigeaud
Chercheur associé à l'Université de Rennes 1





Planète de virus

Carl Zimmer

Belin, 2016
(128 pages, 16 euros).

Il y aurait davantage de virus sur Terre que d'étoiles dans l'Univers, proclame la couverture. On reconnaît déjà à cette invérifiable comparaison choc la manière pleine d'efficacité d'un bon vulgarisateur américain. Oui, la virosphère est l'une des composantes majeures de notre milieu de vie. L'auteur l'esquisse à gros traits en traitant du rhume, de la grippe, des cancers, des phages, des rétrovirus, du VIH, du virus du Nil occidental, du virus Ebola et du seul virus jamais éradiqué, celui de la variole. Impressionnant, intéressant et très efficace !



Mojave épiphanie

Ewen Chardronnet

Inculte, 2016
(384 pages, 19,90 euros).

Non, l'ingénieur nazi Wernher von Braun n'a pas tout fait ! Dans ce très intéressant récit, l'auteur rappelle le rôle méconnu des hommes et des femmes qui, dans les années 1930-1950, ont posé les bases de l'aérospatiale américaine. Visionnaires, illuminés, artistes, ils ont eu des vies compliquées, notamment par le harcèlement du gouvernement en raison de leurs sympathies politiques. Bien documenté, ce livre relate nombre d'épisodes remarquables de l'aventure de ces pionniers et rend justice à leur importance.

Tant qu'on a la santé

Jacques Belghiti et Annette Vezin

Fayard, 2016
(304 pages, 19 euros).

Factuel, précis, bien écrit et clair, ce livre traite de près de 300 idées relatives à notre santé visuelle, auditive, vasculaire, cellulaire, sexuelle, morale, mentale, etc. Jacques Belghiti, l'un des auteurs, est professeur de médecine et chef de service à l'hôpital Beaujon ; de plus, il s'est fait aider par des experts des questions traitées. Ce qui rend cette suite de paragraphes souvent mêlés d'humour d'autant plus agréables à lire que l'on sent que leur contenu est fiable. Et, pour chacun d'eux, une référence est donnée.

BLOC-NOTES
de Didier Nordon

DATÉE ET PERTINENTE

Dire qu'une œuvre est datée, c'est lui faire un reproche. Voilà qui est bizarre. Newton n'a pas fait de simulations sur ordinateur, Bach n'a pas composé de musique électroacoustique, Montaigne n'a pas examiné les effets d'Internet sur les esprits. Leurs œuvres sont datées, mais personne ne leur en fait grief.

Les œuvres humaines ne peuvent qu'être datées. Celles qui le sont le moins ne sont pas les meilleures. Quand, à la radio, je tombe sur une musique dont le style ne m'évoque aucune époque, je trouve qu'elle manque de personnalité. Les grandes œuvres exploitent au maximum les voies propres à leur temps.



Dans une œuvre qui a mal vieilli, nous ne percevons rien d'essentiel ou de durable. Nous ne sommes plus sensibles qu'aux circonstances qui l'entourent – en général, son époque. Nous lui reprochons donc d'être datée. Mais le fait qu'elle ne nous parle plus ne tient pas au fait qu'elle est datée.

DÉCHETS MULTIVERSELS

Oh ! Combien de penseurs, combien de philosophes, partis conquérir l'universel, en sont revenus avec des thèses bien plus contingentes qu'ils ne le croyaient ! Pourtant, ils avaient sous les yeux une manifestation indubitable de l'universel : le déchet. Tout, du plus petit animal terrestre au plus lointain objet céleste, en produit.

Les grands mécanismes de l'Univers – les galaxies, les étoiles, les planètes – sont, comme les êtres vivants et leurs sociétés,



des « structures dissipatives », à savoir des systèmes ouverts, loin de l'équilibre thermodynamique. À partir d'énergie et de matière importées de leur environnement, ils fabriquent de l'ordre, c'est-à-dire se maintiennent en tant que structures, et ils exportent de l'énergie et de la matière transformées. Ainsi, une étoile absorbe de l'énergie gravitationnelle, grâce à laquelle elle évite d'évoluer vers le désordre qui entraînerait sa disparition, et émet un rayonnement électromagnétique, qui joue pour elle le rôle d'un déchet. Le déchet rejeté par le Soleil rend possible la vie sur Terre (d'après Christian Duquennoi, *Les Déchets. Du big bang à nos jours*, Quæ, 2015).

L'universel, qui inspire aux théoriciens tant de supputations douteuses, se réalise dans l'omniprésence du déchet. Saine leçon d'humilité, que cette immixtion du trivial dans l'éthéré ! Comme la science envisage désormais la possibilité d'univers multiples, la production de déchet est peut-être même, qui sait ?, multiverselle.

LA CONSCIENCE DE LA MODE

Il y a une mode pour les vêtements, il y en a une pour les idées. Bien que se vêtir sans souci du dernier cri soit moins difficile, donc plus fréquent, que ne pas se laisser envahir par les idées en vogue, les gens conscients de suivre la mode vestimentaire sont plus nombreux que les gens conscients d'être influencés par la mode intellectuelle. Pourtant, s'accuser l'un l'autre d'avoir pour seul talent l'agilité à s'approprier les idées véhiculées par l'air du temps est un sport très répandu chez les intellectuels.

S'habiller le corps rendrait-il plus lucide que s'habiller l'esprit ?

DU GÉNÉRAL ET DU PARTICULIER

Que la laitière s'appelle Perrette a son importance. De même qu'ont leur importance son habit (« Cotillon simple et souliers plats »), ses rêves quand elle imagine son lait vendu à un bon prix, et cent autres détails. Bien sûr, ceux-ci auraient pu être différents. Reste que donner des détails est nécessaire pour que la scène ait de la vie. Le lecteur se sent alors partie prenante. Lui aussi pourrait raconter, avec ses propres détails, comment a capoté telle affaire qu'il croyait faite. Paradoxe : en décrivant des circonstances particulières, La Fontaine enseigne que la mésaventure de Perrette peut arriver à tout le monde.



Imaginons maintenant un physicien. Peut-être, jugeant peu vraisemblable la raison que La Fontaine donne à la chute du lait, se demandera-t-il si un phénomène de résonance a amplifié le ballottement du lait et contribué au déséquilibre du pot. En ce cas, il concentrera son attention sur la forme du pot et sur le rythme de marche de Perrette. L'exclamation « adieu veau, vache, cochon, couvée », qui contribue tant à la célébrité de la fable, ne lui sera là d'aucun intérêt. Pour expliquer la chute, ce physicien élague les détails annexes.

Un événement singulier, qui s'est passé en ce lieu-ci et pas un autre, à cette époque-là et pas une autre, avec tels protagonistes et pas tels autres, etc., permet parfois à un écrivain de raconter une histoire où tous les lecteurs trouvent à se reconnaître. Il parvient au général en exprimant le particulier. Pour énoncer une loi à laquelle nous sommes tous soumis, un physicien, au contraire, ne mentionne que ses strictes conditions d'application. Il parvient au général en effaçant le particulier. ■

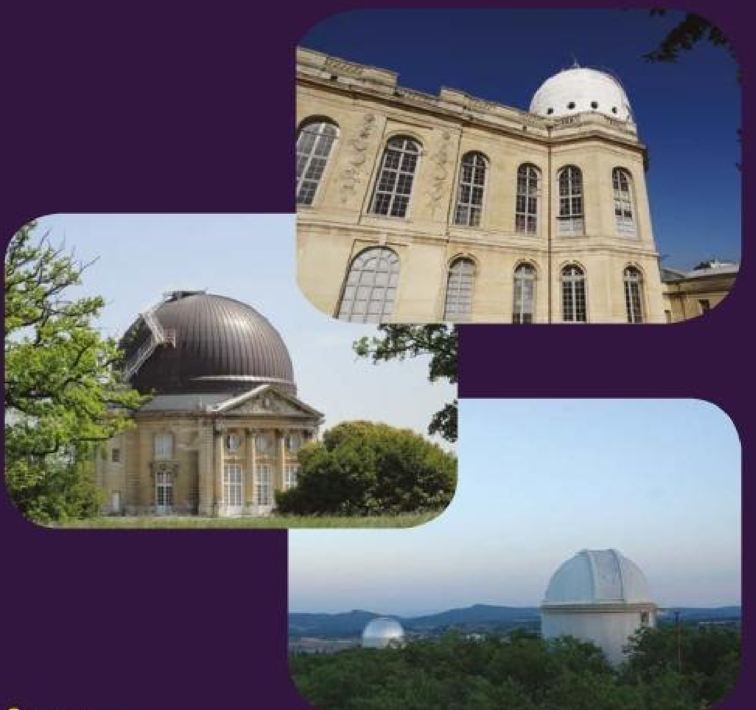
Imprimé en France – Maury Imprimeur S.A. Malesherbes – Dépôt légal 5636 – Juin 2016 – N° d'édition 0770464-01 – Commission paritaire n° 0917 K 82079 – Distribution : Presstalis – ISSN 0 153-4092 – N° d'imprimeur 208 707 – Directrice de la publication et Gérante : Sylvie Marcé.

OBSERVATOIRE DE PARIS

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ

EN PRÉSENTIEL ET À DISTANCE

"EXPLORER ET COMPRENDRE L'UNIVERS"



Objectifs

L'Observatoire de Paris propose la préparation d'un diplôme d'Université permettant d'acquérir un panorama des connaissances actuelles et des recherches en cours en astronomie et en astrophysique auprès d'astronomes professionnels.

Publics concernés

Ces cours s'adressent à toutes les personnes passionnées d'astronomie et de niveau baccalauréat scientifique ou équivalent.
Les étudiants inscrits à l'université dans le cadre du LMD peuvent valider en ECTS sous réserve d'accord avec leur responsable pédagogique.
Possibilité d'inscription dans le cadre de la formation permanente.

Contenu

Cette formation, de niveau L1-L2, peut être suivie en présentiel et à distance sous forme de cours le mardi soir de 17h à 20h à l'Observatoire de Paris ou de cours filmés en différé.
Un stage pratique de traitement de données a lieu en mars à l'Observatoire de Meudon.
Un stage facultatif de 4 nuits d'observation a lieu l'été à l'Observatoire de Haute-Provence.
Les sujets abordés sont les suivants :

- Mécanique céleste et astrométrie
- Histoire de l'astronomie
- Ondes et instruments
- Le soleil
- Planétologie comparée
- Traitement de données
- Etoiles et milieu interstellaire
- Galaxies
- Cosmologie
- Observations



Inscriptions

Dossiers à déposer avant le 15 septembre sur le site d'inscription en ligne :
https://ufe.obspm.fr/candidatures_ufe

Renseignements

http://duop.obspm.fr/-DU-Explorer-et-Comprendre-l-Univers-

contact.duecu@obspm.fr
Téléphone : 01.45.07.78.87



UNITÉ DE FORMATION ET D'ENSEIGNEMENT
Observatoire de Paris, 5 place Jules Janssen 92 195 Meudon

Chimie de l'environnement

Cet ouvrage s'appuie sur les notions de base de la chimie afin de rationaliser l'impact des phénomènes naturels et anthropogéniques sur l'environnement, la santé, et le développement durable. Une grande place est faite aux progrès de la chimie verte.

Tous les grands thèmes environnementaux sont abordés :

» chimie atmosphérique et pollution de l'air
» couche d'ozone
» gaz à effet de serre
» carburants fossiles, biocarburants, énergie nucléaire
» changements climatiques
» chimie de l'eau et pollution
» composés organiques toxiques
» sols, déchets, recyclage

Baird | Cann

Chimie de l'environnement

de boeck supérieur

C. BAIRD, M. CANN

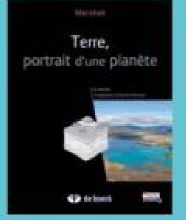
Traduction : J.-P. Joseleau, R. Perraud
2016 • 9782804192174 • 832 pages
79,00 €



VOUS ÊTES ENSEIGNANT ET VOUS SOUHAITEZ DÉCOUVRIR CES OUVRAGES POUR VOS COURS ? CONTACTEZ-NOUS !

enseignant@deboecksuperieur.com

DÉCOUVREZ ÉGALEMENT



Terre, portrait d'une planète
9782804188092
2014 • 1000 pages
88 €



Sciences de la conservation
9782804184902
2014 • 376 pages
54 €



En librairie et sur www.deboecksuperieur.com